

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Інженерно-фізичний факультет
Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

«На правах рукопису»
УДК 621.762.53

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) В. І. Мазур
(ініціали, прізвище)
“ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація
за освітньо-професійною програмою
Нанотехнології та комп’ютерний дизайн матеріалів

зі спеціальності 132 Матеріалознавство
на тему: Структура і властивості мідно-матричного композиту армованого
евтектичними частинками $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$

Виконав: магістрант II курсу, групи ФК-81мп
(шифр групи)

_____	<u>Сидоренко Артем Іванович</u>	_____
	(прізвище, ім’я, по батькові)	(підпис)
Науковий керівник	<u>асист., к.т.н., Солодкий Є. В.</u>	_____
	(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)	(підпис)
Консультант (розділ охорони праці)	<u>доц., к.т.н., Арламов О. Ю.</u>	_____
	(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)	(підпис)
Консультант (економічно-організац. розділ)	<u>доц., к.е.н., Петренко К. В.</u>	_____
	(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)	(підпис)
Нормоконтроль	<u>доц., к.т.н., Бірюкович Л. О.</u>	_____
	(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)	(підпис)
Рецензент	_____	_____
	(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)	(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань
Магістрант _____
(підпис)

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет	Інженерно-фізичний
Кафедра	Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	132 МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
Освітньо-професійна програма	Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

В. о. завідувача кафедри

Мазур В. І.

(прізвище ініціали)

(підпис)

“ ” 2019 р.

З А В Д А Н Н Я

на магістерську дисертацію магістранту

Сидоренку Артему Івановичу

1. Тема дисертації: Структура і властивості мідно-матричного композиту армованого евтектичними частинками $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$

Науковий керівник: асист., к.т.н. Солодкий Є. В.

затверджений наказом по університету від 12 листопада 2019 року № 3890-с.

2. Строк подання дисертації: 19.12.2019р.

3. Вихідні дані до дисертації: Аналіз сучасного проблеми катодів електронно-контактного зварювання повинен дати можливість сформулювати основні проблеми та напрямки їх вирішення.

4. Зміст пояснювальної записки:

а) літературний огляд:

– проаналізувати сучасний стан проблеми матеріалів електродів контактного зварювання;

- проаналізувати різновиди матеріалів електродів контактного зварювання;
- провести аналіз методів отримання електродів;

б) матеріали та методи досліджень:

- отримати зразки іскроплазмового спікання;
- провести комплексні дослідження структури, фазового складу, мікротвердості та електропровідності.

в) результати досліджень та їх обговорення:

- проаналізувати отримані результати;
- обґрунтувати природу явищ, які супроводжують процеси формування властивостей матеріалів та розкривають природу цих властивостей.

г) розділ охорони праці та безпеки в надзвичайній ситуації:

- визначити шкідливі та небезпечні виробничі фактори;
- проаналізувати безпечність технологічного процесу та виробничого обладнання.

д) енергетичний розділ:

- провести розрахунок кількості електроенергії, необхідної для забезпечення нормальної роботи цеху;

е) економічний розділ:

- обґрунтувати необхідну кількість робітників та управлінського персоналу, розмір фонду їх заробітної плати, визначити показники продуктивності праці;
- довести, що розроблений проект є ефективний.

ж) розробка стартап-проекту:

- провести маркетинговий аналіз для виявлення ринкової можливості використання результатів магістерської дисертації.

5. Перелік графічного матеріалу: презентація.

6. Консультанти розділів дисертації:

Розділ	Прізвище,	Підпис, дата
--------	-----------	--------------

	ініціали та посада консультанта	завдання видав	завдання прийняв
Економічний розділ	Петренко К. В.		
Розділ охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	Арламов О. Ю.		

7. Дата видачі завдання: 09.09.2019 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Літературний огляд	24.09.2019	
2	Отримання експериментальних даних	17.10.2019	
3	Аналіз отриманих результатів	11.11.2019	
4	Обґрунтування результатів	26.11.2019	
5	Розробка розділу охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	27.11.2019	
6	Розрахунок енергетичного розділу	30.11.2019	
7	Розробка економічного розділу та стартап-проекту	02.12.2019	
8	Оформлення пояснювальної записки	12.12.2019	

Магістрант

Сидоренко А. І.

Науковий керівник дисертації

Солодкий Є. В.

РЕФЕРАТ

Робота містить: 98 сторінок, 14 рисунків, 20 таблиць, 51 джерело.

Ключові слова: МІДНИЙ МАТРИЧНИЙ КОМПОЗИТ, ІСКРОПЛАЗМОВОЕ СПІКАННЯ; ЕВТЕКТИЧНІ ЧАСТИНКИ, МІКРОСТРУКТУРА, ЕЛЕКТРИЧНА ПРОВІДНІСТЬ, ТВЕРДІСТЬ.

Об'єктом дослідження є мідно-матричний композит (ММК) зміцнений евтектичними частинками $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$.

Метою даного дослідження є розробка нового мідно-матричного композиту з високими механічними властивостями і електричною провідністю.

Методи дослідження та обладнання: $\text{Cu}/(\text{LaB}_6\text{-TiB}_2)$ ММК було виготовлено методом іскрового плазмового спікання. Методами рентгеноструктурного та мікроструктурних аналізу з використанням рентгенівського дифрактометра Ultima IV ф. Rigaku і мікрорентгеноспектрального аналізу з використанням скануючого електронного мікроскопа, СЕМ, фазові і структурні перетворення в композиті були досліджені. Твердість композиту визначалася методом механічних випробувань.

У цьому дослідженні мідні матричні композити (ММК), що містять 2,5, 5, 7,5, 15 і 30 мас. % евтектичних частинок $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$, були успішно виготовлені методом іскроплазмового спікання. Досліджено вплив кількості армуючої фази на твердість і електропровідність. Збільшення масової частки армованих частинок до 7,5 мас. % забезпечує збільшення твердості майже в три рази в порівнянні з твердістю чистої міді, в той час як електропровідність досягає 77% IACS.

РЕФЕРАТ

Работа содержит: 98 страниц, 14 рисунков, 20 таблиц, 51 источник.

Ключевые слова: МЕДНЫЙ МАТРИЧНЫЙ КОМПОЗИТ, ИСКРОПЛАЗМОВОЕ СПЕКАНИЕ; ЭВТЕКТИЧЕСКИЕ ЧАСТИЦЫ, МИКРОСТРУКТУРА, ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ, ТВЕРДОСТЬ.

Объектом исследования является медно-матричный композит (ММК) усиленный эвтектическими частицами $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$.

Целью данного исследования является разработка нового медно-матричного композита с высокими механическими свойствами и электрической проводимостью.

Методы исследования и оборудование: $\text{Cu}/(\text{LaB}_6\text{-TiB}_2)$ КМЦ было изготовлено методом искрового плазменного спекания. Методами рентгеноструктурного и микроструктурного анализа с использованием рентгеновского дифрактометра Ultima IV ф. Rigaku и микрорентгеноспектрального анализа с использованием сканирующего электронного микроскопа, СЭМ, фазовые и были исследованы структурные превращения в композите. Твердость композита определялась методом механических испытаний.

В этом исследовании медные матричные композиты (КМЦ), содержащие 2,5, 5, 7,5, 15 и 30 мас. % эвтектических частиц $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$, были успешно изготовлены методом искроплазменного спекания. Исследовано влияние количества армирующей фазы на твердости и электропроводности. Увеличение весовой доли армированных частиц до 7,5 мас. % обеспечивает увеличение твердости почти в три раза по сравнению с твердостью чистой меди, в то время как электропроводность достигает 77% IACS.

ABSTRACT

The work contains 98 pages, 14 figure, 20 tables, 51 sources.

Keywords: COPPER MATRIX COMPOSITE, SPARK PLASMA SINTERING, EUTECTIC PARTICLES, MICROSTRUCTURE, CONDUCTIVITY, HARDNESS.

Object of research is a copper matrix composite (CMC) with eutectic particles $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$.

The objective of this work research is to develop new copper matrix composite with high mechanical properties and electrical conductivity.

Research methods and equipment: $\text{Cu}/(\text{LaB}_6\text{-TiB}_2)$ CMC were fabricated via spark plasma sintering. By methods of X-ray diffraction and microstructural analysis using X-ray diffractometer Ultima IV f. Rigaku and microstructure analysis using a scanning electron microscope, SEM, phase and structural transformations in composite were investigated. The hardness was determined by the method of mechanical tests.

In this study, copper matrix composites (CMCs) containing 2.5, 5, 7.5, 15 and 30 wt% $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$ eutectic particles were successfully fabricated by spark plasma sintering technique. The influence of the amount of refractory phase on the hardness and electrical conductivity was investigated. An increase in the weight fraction of the reinforcing particles up to 7.5 wt.% provides an increase in hardness of threefold compared to that of pure copper, while electrical conductivity was as high as 77 %IACS.

Зміст

ВСТУП.....	11
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	12
1.1 Аналіз стану проблеми катодів електронно-контактного зварювання.....	12
1.1.1 Загальні положення про контактне зварювання.....	12
1.1.2 Класифікація контактного зварювання.....	13
1.1.2.1 Точкове зварювання.....	13
1.1.2.2 Рельєфне зварювання.....	14
1.1.2.3 Шовне зварювання.....	15
1.1.2.4 Стикове зварювання.....	16
1.1.3 Зварювання оплавленням.....	17
1.2 Вимоги до матеріалів катоду контактного зварювання.....	18
1.3 Матеріали, що застосовуються для виготовлення катодів.....	22
1.3.1 Сплави на основі міді.....	22
1.3.2 Композиційні матеріали на основі міді.....	26
1.3.2.1 Композити мідь-оксиди.....	26
1.3.2.2 Композити мідь-карбіди.....	31
1.3.2.3 Композити мідь-бориди.....	37
1.3.2.4 Композити на основі міді з іншими добавками.....	39
1.4 Іскроплазмове спікання.....	40
1.5 Висновки та постановка задач дослідження.....	43
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	44
2.1 Вихідні матеріали.....	44
2.2 Подрібнення евтектичного порошку.....	44
2.3 Змішування порошків.....	44
2.4 Іскроплазмове спікання.....	44
2.5 Підготування поверхні спечених зразків.....	45
2.6 Мікроструктурні дослідження зразків.....	45
2.7 Рентгенофазовий аналіз.....	47
2.8 Визначення мікротвердості.....	48

2.9	Визначення електричної провідності.....	50
3	РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	51
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	56
4.1	Мета розділу.....	56
4.2	Безпека технологічного обладнання.....	56
4.3	Безпека технологічного процесу.....	57
4.4	Висновки з розділу охорони праці.....	60
5	ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	62
6	ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ.....	64
6.1	Розрахунок чисельності виробничих робітників.....	64
6.2	Визначення фондів заробітної плати.....	67
6.3	Розрахунок продуктивності праці.....	69
7	ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	71
7.1	Науково-технічна актуальність ДР.....	71
7.2	Мета та задачі науково-дослідницької роботи.....	72
7.3	Розрахунок планової собівартості проведення дослідження.....	72
7.3.1	Розрахунок фонду заробітної плати виконавців.....	73
7.3.2	Єдиний соціальний внесок.....	74
7.3.3	Витрати на спец. обладнання для проведення експериментів.....	75
7.3.4	Визначення витрат на матеріали, необхідні для проведення експериментів.....	75
7.3.5	Визначення витрат на службові відрядження.....	76
7.3.6	Визначення інших прямих неврахованих витрат по темі.....	76
7.3.7	Накладні витрати.....	76
7.3.8	Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми.....	76
7.4	Науково-технічна ефективність дослідницької роботи.....	77
7.5	Висновки з розділу.....	78
8	РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	79
8.1	Актуальність.....	79
8.2	Мета і завдання стартап проекту.....	79
8.3	Опис ідеї проекту.....	80

8.4 Технологічний аудит ідеї проекту	80
8.5 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	81
8.6 Розроблення ринкової стратегії проекту	86
8.7 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	87
8.8 Формування системи збуту	88
8.9 Висновки до розділу	89
ВИСНОВКИ	90
CONCLUSIONS	91
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	92

ВСТУП

Контактне точкове зварювання в багатьох галузях промисловості і в будівництві грає величезну роль. Авіаційна та автомобільна промисловість, вагонобудування, радіотехніка, електротехніка, машинобудування та апаратобудування, виробництво виробів домашнього вжитку і культурно-побутового призначення - всі ці галузі техніки використовують зараз контактне точкове зварювання [1].

Незважаючи на наявний великий вибір матеріалів для електричних контактів, проблема створення високонадійних електричних контактів ще не вирішена та й не може бути остаточно вирішена через удосконалення конструкцій комутаційних апаратів, розширення галузей їх використання та підвищення вимог до матеріалу контактів. Вимоги до матеріалів та конструкції електродів для машин контактного зварювання обумовлені специфічними умовами роботи електродів – значним нагрівом із одночасним стисненням, тепловими напруженнями, які виникають всередині електроду внаслідок нерівномірного нагріву та ін. [1].

Стабільність якості зварного з'єднання залежить від збереження форми робочої поверхні електрода, яка контактує із поверхнею закріпленого зразка, що зварюється [2].

Зазвичай стійкість електродів для точкового зварювання визначають експериментально за кількістю точок, що зварені у інтенсивному режимі, при якому діаметр торця електроду збільшується до розмірів, що потребують його заточування (значення приблизно дорівнює 20%) [3].

Перегрів, окиснення, зміщення електродів при нагріванні та деформація підсилюють знос контактного електроду [3].

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Аналіз стану проблеми катодів електронно-контактного зварювання

1.1.1 Загальні положення про контактне зварювання

Зварювання – це технологічний процес утворення нероз'ємного з'єднання між матеріалами при їх нагріванні та/або пластичному деформуванні за рахунок встановлення міжмолекулярних і міжатомних зв'язків. На сьогодні відомо близько 70 способів зварювання. В основу їхньої класифікації покладено дві ознаки: агрегатний стан матеріалу в зоні зварювання та вид енергії, яка використовується для утворення з'єднання. Розвиток машинобудування і приладобудування багато в чому пов'язаний з використанням високоефективних та економічних способів зварювання, зокрема контактного зварювання [3].

Фізична сутність процесу зварювання полягає в утворенні міцних зв'язків між атомами і молекулами на з'єднувальних поверхнях заготовок. Для утворення сполук необхідно виконання наступних умов: звільнення зварювальних поверхонь від забруднень, оксидів та адсорбованих на них чужорідних атомів; енергетична активація поверхневих атомів, що полегшує їх взаємодію один з одним; зближення зварювальних поверхонь на відстані, порівнянним з міжатомних відстанню в зварюваних заготовках [4].

Контактне зварювання – це один з найбільш поширених видів отримання нероз'ємних з'єднань з найрізноманітніших конструкційних матеріалів. На сьогодні приблизно 40% усіх зварних з'єднань виконується за допомогою контактного зварювання, а за ступенем автоматизації контактне зварювання займає перше місце серед інших видів зварювання. Контактне зварювання переважно використовується у багатьох галузях промисловості при масовому або серійному виробництві однотипних виробів. Даним видом зварювання можливо з'єднувати практично усі відомі конструкційні матеріали: леговані та низьковуглецеві сталі, жароміцні і корозійностійкі сталі, сплави на основі алюмінію, магнію, титану та ін. [4].

Контактне зварювання відбувається за рахунок ефекту нагріву деталей, які зварюють, до плавлення в місці їх з'єднання. Нагрівання відбувається за рахунок теплоти, яка виділяється електричним струмом у короткозамкненому контурі. Таким чином, контактне зварювання – це процес утворення нероз'ємних з'єднань конструкційних матеріалів в результаті їх короточасного нагріву електричним струмом та пластичної деформації при стискуванні. Утворення з'єднання між виробами при зварюванні відбувається шляхом встановлення міжмолекулярних і міжатомних зв'язків в зоні контакту цих виробів [1].

1.1.2 Класифікація контактного зварювання

Контактне зварювання можна класифікувати за наступними ознаками [3]:

- за технологією одержання з'єднань (точкове, рельєфне, шовне, стикове зварювання);
- за конструкцією з'єднання (внапуск або стикове);
- за станом металу в зоні зварювання (з плавленням металу або без плавлення);
- за способом підведення струму (одно- та двостороннє);
- за типом зварювального струму та формою імпульсного струму;
- за кількістю з'єднань, які виконуються одночасно;
- за наявністю додаткових з'єднувальних компонентів.

Коротко розглянемо способи контактного зварювання.

1.1.2.1 Точкове зварювання

Точкове зварювання – спосіб контактного зварювання, при якому деталі з'єднуються по окремим локальним ділянкам дотику (по точкам). При точковому зварюванні деталі збирають внапуск, стискають електродами та пропускають імпульс струму, при цьому в місці найбільшого електричного опору (область контакту між деталями) відбувається взаємне плавлення металу

деталей з утворенням ядра (рис. 1.1). Після виключення струму розплавлений метал ядра швидко кристалізується, в результаті чого утворюється атомний зв'язок між деталями. Даний спосіб зварювання є найбільш поширеним, оскільки на його частку припадає приблизно 70% усіх з'єднань, які виконуються контактним зварюванням. Наприклад, в конструкціях сучасних автомобілів нараховується від 5000 до 7000 точок, пасажирських вагонах – до 30000 точок. Товщина деталей для зварювання знаходиться в межах від декількох мікрон до 30 мм [5].

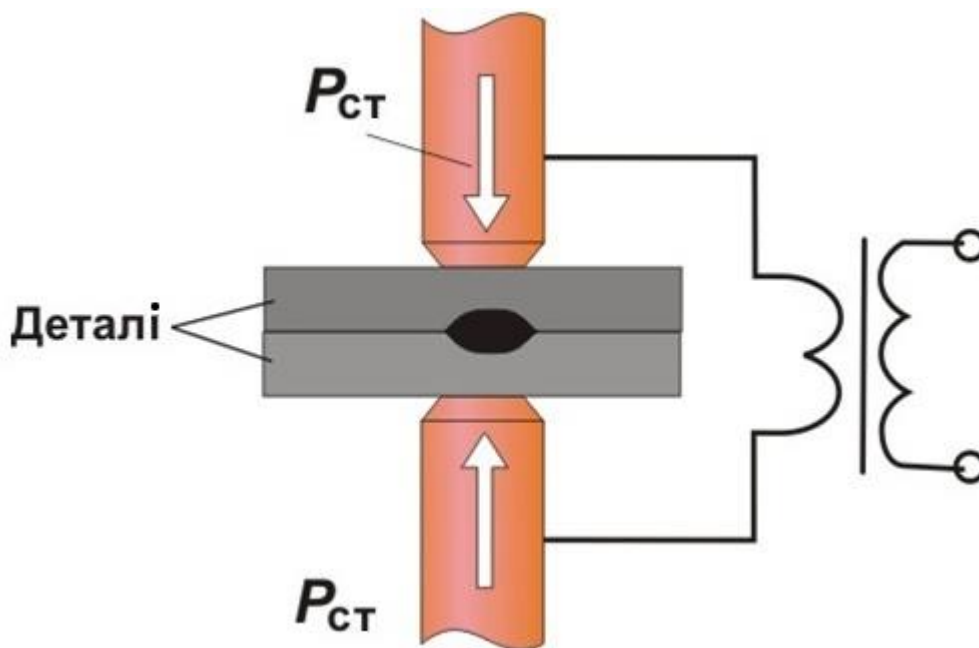


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення точкового зварювання

1.1.2.2 Рельєфне зварювання

Рельєфне зварювання відрізняється наявністю попередньо сформованого рельєфу – виступу на поверхні однієї з деталей, який обмежує початкову площу контакту деталей (рис. 1.2). В результаті цього при зварюванні в цій зоні зростає густина струму та швидкість тепловиділення. Під час зварювання рельєф під дією зварного зусилля поступово деформується до повного зникнення з утворенням ядра розплавленого металу. Таким способом можливо одержати одночасно декілька точок або безперервний щільний шов [3].

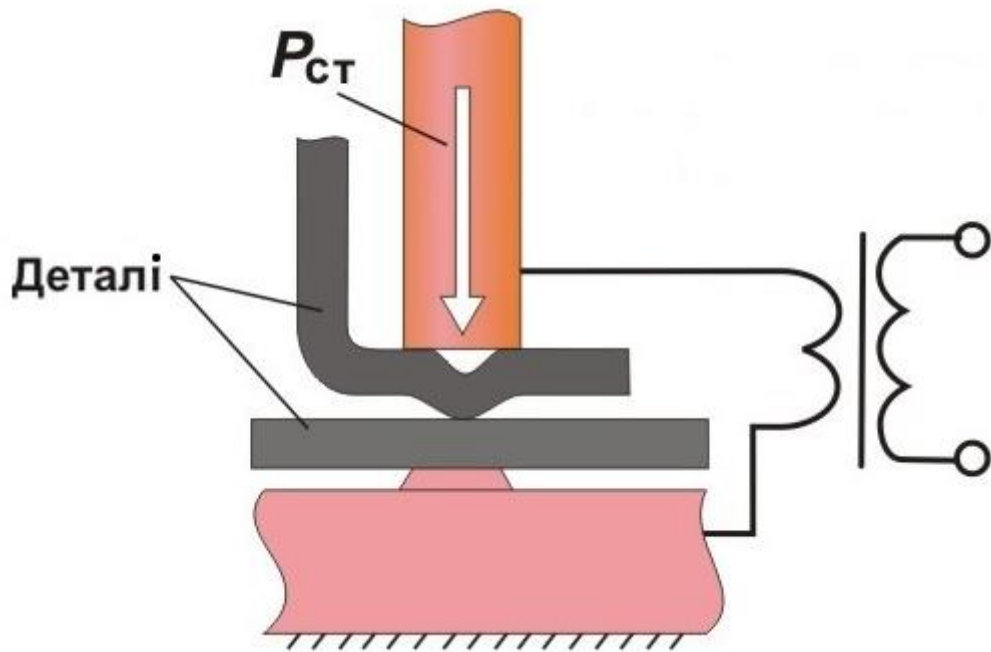


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення рельєфного зварювання

1.1.2.3 Шовне зварювання

Шовне зварювання – різновид зварювання, при якій листи з'єднуються безперервним або переривчастим швом, що складається з окремих зварних точок, до яких підводиться струм (рис. 1.3). В свою чергу точки приєднані до обертових дискових електродів (ролики), які щільно стискають, прокочують і зварюють, після чого йде з'єднання. Зварювальний струм, як і при точковому зварюванні, нагріває й розплавляє метал у місці з'єднання. В залежності від того чи обертаються ролики безперервно при зварюванні або зупиняються на час проходження струму, розрізняють безперервне та покрокове зварювання. Товщина зварювальних листів складає від 0,2 мм до 3 мм [6].

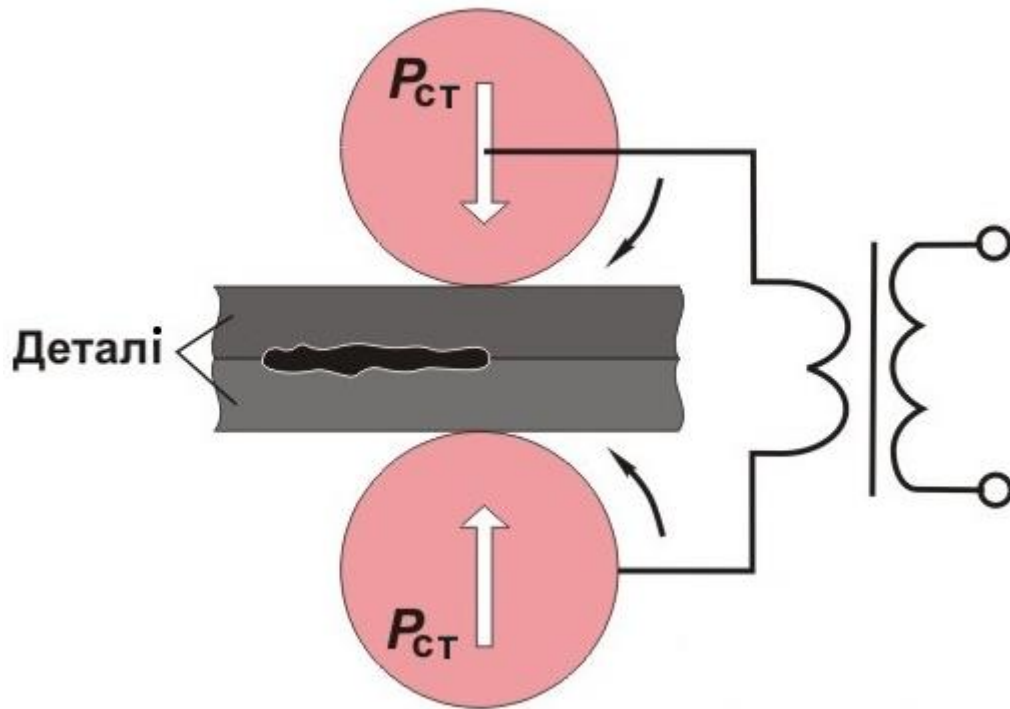


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення шовного зварювання

Шовне зварювання здебільшого проводиться з зовнішнім водяним охолодженням, що також знижує перегрів зовнішніх шарів металу. Різноманітні види шовного зварювання, що зустрічаються на практиці, в основному розрізняються способом підведення зварювального струму (одностороннім або двостороннім) і розташуванням роликів щодо деталей, що зварюються. Шовне зварювання застосовують при виготовленні різних ємностей, де потрібні герметичні шви – бензобаки, труби, бочки та ін. [6].

1.1.2.4 Стикове зварювання

Стикове зварювання – спосіб контактного зварювання відноситься до контактного виду зварювання, при якому торцеві поверхні деталей обробляють, деталі підводять одна до другої встик і вмикають струм (рис. 1.4). За ступенем нагріву торцевих поверхонь деталей розрізняють зварювання опором та зварювання оплавленням. У випадку зварювання опором після нагрівання металу в місці контакту до пластичного стану збільшують осьове зусилля. У стику відбувається пластична деформація, з'єднання утворюється без

розплавлення металу. Цим способом не завжди вдається забезпечити рівномірне нагрівання деталей великого перетину по всій площі і досить часто видалити зі стику деталей окисні плівки. Тому стикове зварювання опором застосовують тільки для з'єднання деталей малого перетину [3, 7].

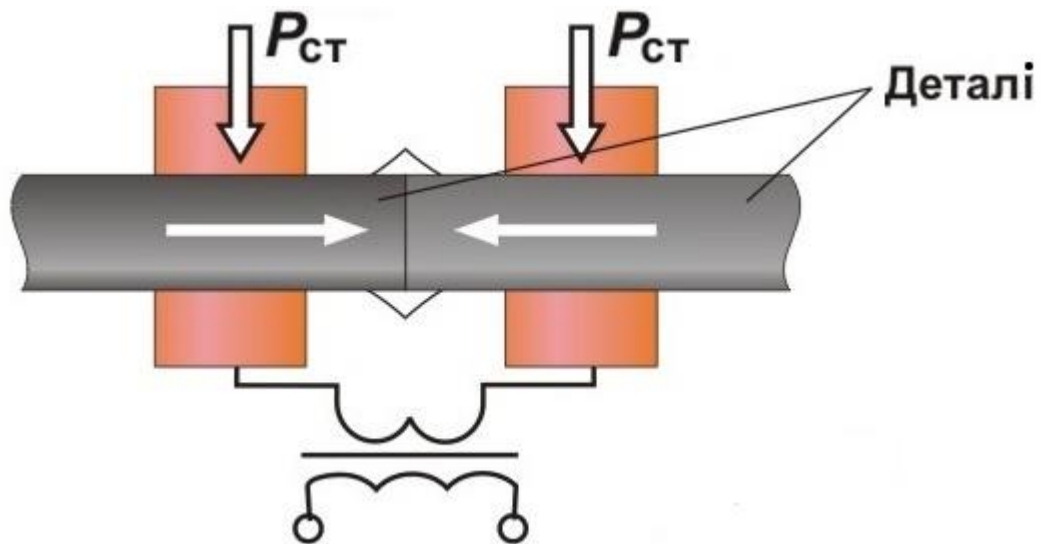


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення шовного зварювання

При двох останніх способах деталі спочатку сильно нагрівають, а потім з'єднують. Різниця ж полягає в наступному. При безперервному оплавленні металовиріб стабільно нагрівають протягом всієї процедури зварювання, а при переривчастому – деталь то нагрівають, то дають їй охолонути. Це робиться з метою економії ресурсів обладнання. Цікаво, що під впливом електродинамічних сил рідкий метал, а також оксиди і забруднення викидаються із зони стику – в результаті виходить дуже чисте з'єднання [7].

1.1.2.5 Зварювання оплавленням

При зварюванні оплавленням деталі притискають одна до іншої, з дуже малим зусиллям при ввімкненому зварювальному трансформаторі. Окремі контакти поверхонь миттєво оплавляються, виникають нові контакти, які оплавляються теж. Під дією електродинамічних сил рідкі прошки металу

оплавлених контактів разом з окислами і забрудненнями викидаються зі стику деталей. Поверхні поступово оплавляються, після чого зусилля стиску різко збільшують – відбувається осадка. При цьому протягом 0,1 с через стик ще пропускають струм. Рідкий метал разом із залишковими окислами, витісняється із зони стику в грат – з'єднання утворюється між твердими, але пластичними поверхнями. При зварюванні оплавленням хімічно активні зони металів у місцях з'єднання захищають інертними газами. За допомогою стикового зварювання з'єднують пруті, профільний прокат, труби по всій площі їхніх торців, а також ріжучий інструмент [3].

1.2 Вимоги до матеріалів катоду контактного зварювання

Електроди незалежно від типу контактного зварювання виконують наступні три основні функції: стискають деталі, підводять струм до деталей та відводять тепло, яке виділяється в деталях в процесі їх зварювання. Таким чином, електроди працюють в складних умовах теплової та механічної дії, яка має циклічний характер. У зв'язку з цим до електродів контактного зварювання ставляться наступні вимоги [3]:

- висока електропровідність, що дозволить пропускати електричний струм великої густини без нагрівання електрода (при цьому слід враховувати, що чим вище електропровідність зварювального матеріалу, тим вище повинна бути електропровідність електродів);
- високі механічні властивості в широкому інтервалі температур, які необхідні для забезпечення тривалої роботи без деформації в умовах стискання при великих та циклічних навантаженнях;
- високий опір до зношування при терті;
- висока теплопровідність для швидкого відведення тепла;
- відсутність хімічної взаємодії з матеріалом деталей, які зварюються;
- висока корозійна стійкість та жаростійкість;
- низька вартість матеріалу електроду та процесу його виготовлення.

З приведених вимог до електродів випливає, що працездатність електродів в основному визначається матеріалом, з яких вони виготовлені. Разом з тим суттєву роль у підвищенні ресурсу роботи електродів має їх конструкція, конструкція вузла електрод – електротримач, спосіб виготовлення електродів. Робоча частина електродів для точкового зварювання зазвичай має плоску або сферичну поверхню. Електроди з сферичною поверхнею менш чутливі до відхилення від осі електродів. Крім того, ресурс роботи електроду суттєво залежить від співвідношення основних розмірів електроду і матеріалу електроду, а також від матеріалу деталей, які зварюються, якості їх поверхні, наявності покриттів, параметрів зварювання (температура зварювання, зусилля стискання електродів, електричні параметри, тривалість зварювального імпульсу), якості з'єднання електрод – електротримач та інших параметрів. Наприклад, температура зварювання визначає температурні параметри електроду, що у свою чергу визначає необхідний рівень фізичних та механічних властивостей матеріалу електроду [4].

Якість електроду будь-якого типу контактного зварювання визначається його стійкістю, тобто здатністю зберігати в певних межах вихідні розміри та форму робочої поверхні, оскільки від форми та розмірів робочої частини електродів залежить якість зварного з'єднання. Збільшення площі контакту електрод-деталь внаслідок зносу призводить до зменшення густини струму і тиску в місці зварювання, що у свою чергу призводить до зміни ядра у порівнянні з оптимальним, зменшенню міцності з'єднання і його якості. Опосередковано стійкість електродів визначається мінімальною кількістю виконаних зварювань до першого переточування електроду та кількістю зварних точок до повного зносу. Однак, враховуючи велику кількість факторів, які впливають на стійкість електродів, даний спосіб оцінки є доволі умовним. З метою виключити якомога більшу кількість факторів та забезпечити об'єктивність оцінки працездатності електроду, випробовування зазвичай проводять на одній зварювальній машині при інших рівних умовах (матеріал деталей, товщина деталей, якість поверхні, температура зварювання, енергетичні параметри, тиск на електроди, умови охолодження). Для характеристики

стійкості електродів іноді використовують зміну діаметру вихідного плоского електроду після певної кількості зварювальних точок (від 500 до 1000 точок), які забезпечують отримання якісних зварювальних з'єднань. Для отримання більш-менш достовірних даних необхідно випробувати від 10 до 20 пар електродів, при цьому сумарна похибка доволі велика та зростає з кількістю виконаних зварювань. Однак даний критерій оцінки стійкості електроду не можна застосувати для всіх матеріалів, які зварюють. Це стосується більшості легких сплавів на основі алюмінію, магнію, титану та деяких благородних металів. В цьому випадку критерій оцінки стійкості електроду по зміні його діаметру не може бути єдиним. У зв'язку з цим є важливою задачею встановлення зв'язку стійкості електроду з будь-якими фізичними або механічними властивостями електроду, що дозволить визначити необхідний комплекс властивостей для створення електродів з високою стійкістю без виконання великої кількості трудомістких випробовувань [8].

Відповідно до [9], кореляційним аналізом було встановлено, що стійкість електродних сплавів пов'язана в основному з такими механічними характеристиками як границя міцності, границя текучості, короточасна та тривала твердість. Однак найбільша кореляція стійкості електродних сплавів спостерігається від характеристик рекристалізації та знеміцнення сплавів. Залежність службових властивостей від електропровідності (теплопровідності) не виявлено, що обумовлено зміною електропровідністю лише в діапазоні від 40% до 100% від провідності міді. Крім того, менш теплопровідний матеріал мав суттєво вищі механічні властивості. З цієї ж причини стійкість при зварюванні може бути однаково високою або однаково низькою в сплавах, які мають різне поєднання електро- і теплопровідності та механічних властивостей в інтервалі робочих температур, а не при кімнатній температурі. Слід зазначити, що температура робочого кінця електроду для більшості сплавів знаходиться в межах від 500 °C до 600 °C при зварюванні вуглецевої сталі та від 500 °C до 700 °C при зварюванні неіржавіючої сталі, а температура всього електроду знаходиться в межах від 100 °C до 200 °C. Однак слід мати на увазі, що роль електро- та теплопровідності має суттєве значення при виготовленні

електродів без охолодження або фігурних електродів, де охолодження ускладнено, а також при оцінці опору до приварювання електроду до деталі, оскільки низька електро- та теплопровідність призводить до зростання температури на робочому кінці електроду. Таким чином, автори стверджують, що стійкість електродів для контактного зварювання визначається головним чином межею текучості в інтервалі робочих температур на поверхні електроду, температурою початку знеміцнення (рекристалізації) та інтенсивністю протікання процесів знеміцнення [9].

Дослідження [10] кривих залежності зміни розміру контактної поверхні електродів, які виготовлені з хромової бронзи (гартування при від 980 °C до 1000 °C, холодна деформація на 60%, старіння при 450 °C, 4 год) від кількості зварювань показало, що практично завжди найбільш інтенсивне збільшення контактної поверхні спостерігається у перші 1000 або 2000 зварювань, а далі збільшується практично пропорційно кількості зварювань. При цьому відбувається зменшення твердості поверхні електроду на глибину не більше 1,5 мм. В центрі контактної поверхні знеміцнення відбувається більш інтенсивно ніж по краях, різниця в твердості складає приблизно вдвічі. Збільшення кількості зварювань до 5000 призводить практично до усунення даної різниці, а діаметр електроду збільшується від 20% до 30% від початкового, що свідчить про необхідність його заміни [10].

При зварюванні також відбувається рекристалізація електродів, яка починається вже після 200 зварювань та після 500 зварювань первинна рекристалізація закінчується. Зі збільшенням кількості зварювань відбувається рекристалізація нових об'ємів матеріалу від центру до країв, яка (первинна рекристалізація) закінчується після 2000 зварювань. При цьому рекристалізація має динамічний характер. Період найбільш інтенсивної рекристалізації співпадає з найбільш інтенсивним збільшенням діаметру поверхні електроду (від 1 до 2000 зварювань). Уповільнення рекристалізації електродів досягається шляхом виготовлення їх з дисперсійно твердіючих сплавів за рахунок зупинки або гальмування границь зерен на виділеннях другої фази, яка повинна бути якомога стабільною в часі [3].

1.3 Матеріали, що застосовуються для виготовлення катодів

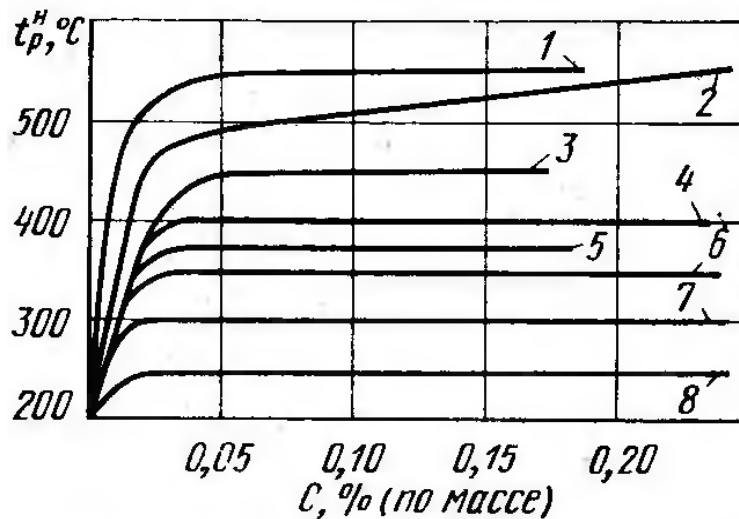
При розробці технології зварювання, окрім вибору способу контактного зварювання, режимів, параметрів зварювання, оптимальної форми і розмірів електроду, необхідно правильно вибрати матеріал для виготовлення електроду. Це забезпечить одержання зварних з'єднань необхідної якості при високій продуктивності процесу [3].

1.3.1 Сплави на основі міді

Першим матеріалом, який використовувався для виготовлення електродів, була мідь. Окрім невисокої вартості, гарної технологічності та корозійної стійкості, цей вибір, насамперед, обумовлений її високою тепло- та електропровідністю. Основним недоліком міді як матеріалу для електроду є порівняно її низькі механічні властивості, які можливо суттєво покращити шляхом її холодної деформації в діапазоні від 40% до 70%. Однак при зварюванні відбувається нагрівання електроду до високих температур, що призводить до рекристалізації та втрати міцності після декількох десятків зварювань [11].

Для підвищення температури рекристалізації та міцності міді можна досягти шляхом її легування іншими елементами. Найбільший вплив на ці характеристики мають добавки в кількості тисячних та сотих часток проценту (рис. 1.5), а подальше збільшення їх вмісту не призводить до суттєвого збільшення температури рекристалізації. При цьому одночасне введення в мідь декількох елементів при умові, що вони утворюють з міддю твердий розчин, температура початку рекристалізації в більшості випадків підвищується не більше ніж при введенні одної найбільш ефективної добавки. Однак, якщо легуючі елементи утворюють між собою хімічну сполуку, яка виділяється в матриці у вигляді окремої дисперсної фази, то в таких сплавах температура початку рекристалізації визначається вже не впливом окремих елементів, а

властивостями, кількістю та морфологією дисперсних фаз. Слід зауважити, що домішки та легуючі елементи також призводять до підвищення питомого електроопору міді [9].



1 – Zr; 2 – Hf; 3 – Ti; 4 – Cr, Mg, Sn, In, Te; 5 – Mn; 6 – Ag, Nb, Sb, Si, Cd, Al;
7 – P, As, Ge, V, Y; 8 – Co.

Рисунок 1.5 – Вплив домішок або добавок легуючих елементів на температуру рекристалізації міді [9]

На даний момент в світі розроблено доволі велика кількість сплавів на основі міді для їх використання в якості електроду контактного зварювання. За типом зміцнення їх можна поділити на два типи: сплави, які зміцнені холодною деформацією (сплави систем Cu-Ag та Cu-Cd), та сплави, які зміцнені за рахунок старіння пересиченого твердого розчину, тобто дисперсійно зміцнені сплави (сплави систем Cu-Cr, Cu-Cr-Zr, Cu-Co-Si, Cu-Ni-Si, Cu-Ni-Be) [9].

Основними перевагами дисперсійно зміцнених сплавів над сплавами другого типу є висока температура рекристалізації, хороше поєднання міцності, пластичності з тепло- та електропровідністю. Необхідною умовою одержання дисперсійно зміцнених сплавів є розширення ділянки α -твердого розчину з підвищенням температури. При старінні відбувається виділення дрібнодисперсної фази. Такими фазами є хром в хромових бронзах, силіциди Co_2Si , Ni_2Si , інтерметаліди CoBe, NiBe та ін. Ефект від дисперсійного

зміцнення залежить від об'ємної долі, форми, розмірів, кристалічної ґратки виділень. Найбільший ефект досягається в таких системах, які мають суттєву зміну розчинності легуючих елементів в міді в твердому стані з температурою. До таких систем відносять Cu-Ni-Si, Cu-Co-Si, Cu-Co-Be, Cu-Ni-Be. Приріст механічних властивостей в цих системах в результаті старіння складає від 250% до 350% у порівнянні з загартованим станом. В той же час електро- та теплопровідність визначається мінімальною концентрацією легуючих елементів в мідному розчині при температурі старіння (системи Cu-Cr, Cu-Cr-Zr) [9].

Однак, чим більше змінюється розчинність легуючих елементів в твердому розчині основи, тим менш жароміцний сплав. При зменшенні залежності розчинності від температури схильність до коагуляції частинок виділень зменшується, і тому температурний коефіцієнт знеміцнення зменшується. Наприклад, сплави системи Cu-Ni-Si більш міцні в інтервалі температур від 20 °C до 500 °C, тоді як сплави системи Cu-Co-Si більш міцні вище даного температурного інтервалу. Для досягнення більшої розчинності легуючих елементів в міді можливо використовувати високоенергетичне механічне легування або швидку кристалізацію розплаву. Наприклад, застосування цих методів для системи Cu-Zr, в якій розчинність цирконію в міді складає 0,15 мас.%, дозволяє одержати сплави з вмістом цирконію до 6 мас.% та підвищити їх механічні властивості [12].

Для потрійних сплавів або більш складних систем можливо утворення термічно стабільних та міцних хімічних сполук, це дозволяє забезпечити високу міцність та жароміцність сплаву. При утворенні хімічних сполук, які не містять атомів металу-розчинника, суттєво сповільнюються дифузійні процеси, їх коагуляція з підвищенням температури, а відповідно, і сповільнюється знеміцнення. Прикладом цього є сплави систем Cu-Ni-Be, Cu-Co-Be, Cu-Ni-Si, Cu-Co-Si та ін. Таким чином, властивості сплавів визначаються їх діаграмою стану [9].

Властивості дисперсійно зміцнених сплавів також суттєво залежать від температури та часу старіння. Зазвичай, зі збільшенням температури старіння

час витримки, який необхідний для досягнення максимальної твердості, зменшується. Однак значення твердості, які відповідають оптимальному поєднанню інших властивостей, сплав досягає суттєво пізніше помітного розпаду твердого розчину [10].

Холодна деформація між гартуванням та старінням також суттєво підвищує механічні властивості сплавів. Це пов'язано з додатковим зміцненням, яке виходить за рахунок пружних напруг від дислокацій, так і в наслідок зміни в кінетичному і морфологічному аспектах процесу виділення і росту частинок другої фази. Абсолютний рівень механічних властивостей сплавів після термомеханічної обробки суттєво більший, ніж у сплавах після старіння без попередньої деформації. Однак відносний приріст рівня механічних властивостей в результаті старіння в більшості випадків після термомеханічної обробки виходить нижче, що пов'язано з тим, що деформований після гартування сплав має суттєво вищий вихідний рівень механічних властивостей. Однак холодна деформація перед старінням прискорює не тільки процеси зміцнення, але і процеси знеміцнення [11].

Іншим шляхом підвищення експлуатаційних властивостей електродів є ускладнення та оптимізація їх хімічного складу. Як приклад можна навести сплави систем Cu-Ni-Si-Cr та Cu-Co-Si-Cr, в яких зміцнюючими фазами є Ni_2Si , Cr_3Si , Co_2Si , $\text{Cr}_3\text{Co}_5\text{Si}_2$. В даних сплавах при кристалізації та старінні утворюються дві або більше дрібнодисперсні фази, одна з яких забезпечує необхідний ефект старіння, а інша створює необхідну жароміцність та низький темп знеміцнення при нагріві до температур вище температури старіння, що забезпечується шляхом гальмування дифузійних процесів [9].

Ресурс роботи електродів також залежить від матеріалів, які зварюють. Так, в роботі [13] провели дослідження ресурсу роботи електродів, які були виготовлені зі сплавів на основі міді, при зварюванні листів алюмінію марки A5182. Встановлено, що найбільшу швидкість зношування мали електроди Cu-Co-Be та W-Cu ймовірно внаслідок їх низької електропровідності та адгезії до матеріалу деталі, що зварюють. Більший знос нижнього електроду обумовлений генерацією більшої кількості тепла на ньому внаслідок його

електропозитивності та використання постійного струму для зварювання. Найбільшу стійкість при зварюванні алюмінію показав електрод зі сплаву Cu-Cd [13].

1.3.2 Композиційні матеріали на основі міді

1.3.2.1 Композити мідь-оксиди

Останнім часом замість дисперсійно твердіючих хромових і хромоцирконієвих бронз, які одержують литтям, знаходять застосування дисперсійно зміцнені тугоплавкими сполуками композиційні матеріали на основі міді, які отримують методами порошкової металургії. На відміну дисперсійно твердіючих сплавів, де існування зміцнювальної фази залежить від температури (при високих температурах вона розчиняється в матриці), дисперсійно зміцнені матеріали містять тугоплавкі частинки, які не розчиняються в матриці і не взаємодіють з нею аж до температури її плавлення, що обумовлює вищі міцнісні характеристики матеріалів даного класу при високих температурах. Зміцнення в даних матеріалах може відбуватися за рахунок зміцнення наночастинками (механізм Орована), подрібнення структури (співвідношення Холла-Петча), передачі навантаження через матрицю наночастинкам, утворення твердого розчину (зміцнення відбувається внаслідок спотворення кристалічної ґратки легуючими елементами, що підвищує опір до руху дислокацій) та деформаційного зміцнення (зміцнення досягається шляхом пластичної деформації в умовах часткового або повного стримування рекристалізації за рахунок кручення дислокацій, подрібнення та текстурування зерен металу) [14].

В якості дисперсної фази для зміцнення міді найчастіше використовують оксид алюмінію завдяки його низькій вартості, технологічності та безпечності. Найбільш ефективним способом введення оксидів в металеву матрицю є внутрішнє окиснення. Наприклад, в роботі [14] показано, що мідний електрод, який зміцнений частинками Al_2O_3 має майже вдвічі кращі експлуатаційні

характеристики у порівнянні з хромовою бронзою при зварюванні сталей з гальванічним покриттям.

Вплив розміру частинок оксиду алюмінію на властивості композиту Cu-1 об.% Al_2O_3 досліджено в роботі [15]. При розмірі частинок більше 50 нм спостерігається їх агломерація та негомогенний розподіл в матриці, ймовірно внаслідок того, що кількість частинок при збільшенні їх розміру зменшується, що не дозволяє рівномірно їх розподіли звичайним методом змішування. При цьому розмір зерен композиту, зміцненого частинками розміром від 13 нм до 30 нм становить більше 20 мкм на відміну від композитів зміцнених частинками розміром від 50 нм до 500 нм, для яких воно менше, що не зрозуміло чому [15].

Встановлено, що зі збільшенням розміру частинок електропровідність поступово зменшується, тоді як твердість спочатку зростає, а потім знижується. Слід зазначити, що найбільш суттєве зниження електропровідності відбувається при зміцненні композиту частинками розміром від 13 нм до 50 нм. Однак подальше зменшення провідності, хоча і несуттєвого, зі збільшенням розміру частинок при одночасному зменшенні їх розміру не зовсім зрозуміло, оскільки довжина границь, на яких відбувається розсіювання електронів, зменшується. Максимальний ефект від зміцнення спостерігається для композитів з частинками розміром від 50 нм до 200 нм, тоді як для композитів, зміцнених частинками розміром 13 нм цей ефект не значний, ймовірно внаслідок зниження ефективності зміцнення за механізмом Орована при дуже малому розмірі дисперсної фази. Тоді як зменшення твердості при розмірі частинок більше 200 нм обумовлено зменшенням їх кількості, а отже і кількістю бар'єрів для затримки руху дислокацій. Крім того, міцність з'єднання великих частинок Al_2O_3 з матрицею зазвичай нижча за таку для дрібних частинок [15].

Вплив вмісту та розміру частинок Al_2O_3 на властивості міді досліджено в роботі [16] і встановлено, що зерна міді утворюють двійники, що свідчить про зменшення рухливості і кількості дислокацій. В структурі також наявні кластери частинок Al_2O_3 , при цьому зі збільшенням вмісту оксиду алюмінію

частинки розподілені більш рівномірно. Однак процес спікання при цьому гальмується. Також спостерігалось, що використання високих температур та наночастинок дозволяє одержати більш якісний контакт з матрицею. Висока температура спікання ймовірно також призводила до виділення газів внаслідок розкладання оксиду міді, що у свою чергу негативно впливало на кінцеву густину композитів. Твердість композитів зростає з вмістом оксиду алюмінію та у випадку мікрокомпозиту виходить на майже постійні значення при вмісті від 15 об.% до 20 об.%, що обумовлено зменшенням ефективної кількості частинок внаслідок їх агломерації. Найвищі значення твердості (108 HV) одержані для нанокомпозиту Cu-7 об.% Al_2O_3 та 103 HV для мікрокомпозиту Cu-20 об.% Al_2O_3 . Випробовування композитів на стиснення та вигин показало, що зі збільшенням вмісту Al_2O_3 їх міцність знижується. Причиною цього є зменшення пластичності композитів внаслідок введення крихких та непластичних частинок оксиду алюмінію, які збільшують кількість структурних неоднорідностей в композиті. Також виявилось, що нанокомпозити є більш жорсткими у порівнянні з мікрокомпозитами. Руйнування композитів відбувається через накопичення дефектів, а саме розшарування на границях фаз, розтріскування частинок, ріст пустот в матриці навколо включень та їх коалесценція [16].

Порошки композиту Cu- Al_2O_3 також можуть бути одержані частковим окисненням розпилених порошків сплавів Cu-Al, що було зроблено в роботі [17] для одержання композиту Cu-2,75 об.% Al_2O_3 з порошків сплаву Cu-0,6 мас.% Al. Мікроструктура композиту показана на, відповідно до якого частинки $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ мають діаметр 6-24 нм та мають близьку до сферичної форму, а розмір зерен матриці складає приблизно 500 нм. Дисперсні частинки більш-менш рівномірно розподілені в об'ємі зерен матриці, хоча спостерігається їх скупчення на границях зерен. Композит Cu-2,75 об.% Al_2O_3 характеризується вищими механічними та фізичними властивостями ніж матеріал Glidcop® Al-60. Встановлено, що твердість композитів монотонно зменшується зі збільшенням температури відпалу. При цьому відбувається зниження від 15 %

до 20% у порівнянні з вихідним значенням після відпалу при максимальній температурі та ймовірно обумовлено коалесценцією частинок оксиду алюмінію і частковою рекристалізацією зерен матриці. У порівнянні твердість чистої міді швидко зменшується після відпалу при 400 °С внаслідок її рекристалізації. Автори роботи також розраховали внесок механізму Орована, коли рух дислокацій блокується наночастинками, та ефекту Холла-Петча, коли рух дислокацій блокується на границях зерен в дрібнозернистому матеріалі, у зміцнення композитів. Так, зміцнення композиту за допомогою ефекту Холла-Петча та механізму Орована складає 277 МПа та 211 МПа (сумарно 488 МПа проти виміряного $\sigma_{0,2} = 533$ МПа), відповідно. Дещо вище виміряне значення границі текучості у порівнянні з розрахованим обумовлено наявністю додаткових дислокацій, які з'явилися внаслідок різниці КТР фаз та які гальмують рух дислокацій при деформації [17].

Порошок складу Cu-3 об.% MgO був виготовлений шляхом механічного подрібнення суміші оксидів CuO та MgO з наступним відновленням оксиду міді та гомогенізації в атриторі [18]. Твердість композиту складала 90 НВ, яка при підвищенні температури вище 200 °С починає зменшуватися. Найбільш суттєве зменшення твердості відбувається в температурному діапазоні від 200 °С до 400 °С та є наслідком рекристалізації зерен. В діапазоні температур від 400 °С до 500 °С твердість практично не змінюється ймовірно внаслідок наявності дисперсних включень оксиду магнію. Тоді як при температурах вище 500 °С йде вторинна рекристалізація та подальше зменшення твердості. Додавання частинок оксиду магнію призводить до зміцнення міді у порівнянні з чистою за рахунок співвідношення Холла-Петча [18].

В роботі [19] виготовили та дослідили властивості композитів Cu-TiO₂ з 1, 3, 5 та 7 мас.% TiO₂. Встановлено, що зі збільшенням вмісту оксиду титану густина композитів зменшується внаслідок його негативної дії на самодифузію міді. Як і очікувалося, електропровідність композитів зменшується зі збільшенням вмісту добавки та для зразків з вмістом 0, 1, 3, 5 та 7 мас.%TiO₂ , складаючи приблизно 84%, 73%, 55%, 50% та 42% від провідності чистої міді, відповідно [19].

Цими ж авторами досліджено властивості композитів на основі міді з 0, 2,5, 5 та 7,5 мас.% TiO_2 , які були одержані з кристалогідратів нітратів міді та титану з наступною сушкою розпиленням та відновленням воднем оксидів [19]. Встановлено, що границя міцності на розрив, модуль пружності, границя текучості та твердість збільшуються з вмістом оксиду титану за рахунок дисперсійного зміцнення. Наночастинки оксиду титану виступають у ролі бар'єрів для руху дислокацій при пластичній деформації. З іншого боку, згідно з механізмом Оравана, збільшення твердості обумовлено подрібненням структури та стримуванням росту зерен частинками TiO_2 , що також призводить до підвищення міцності за механізмом Холла-Петча. Зменшення провідності з вмістом TiO_2 пов'язано з розсіюванням руху електронів на поверхні частинок та на границях зерен [19].

В роботі [20] дослідили властивості нанокompозитів Cu- 3, 6 та 9 мас.% ZrO_2 , порошки якого були одержані хімічним осадженням аміаком оксидів з $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ та ZrOCl_2 з наступним відновленням в водні при 500 °С, 1 год. Одержані порошки потім пресували при 700 МПа та спікали в водні при 950 °С впродовж 2 год. Відповідно до РФА порошки після відновлення в водні складаються з двох фаз – міді та діоксиду цирконію з областю когерентного розсіювання 185 нм та 45 нм, відповідно. Частинки порошку, як до так і після відновлення, мали неправильну форму, а їх розмір був до 100 нм. Тоді як форма більшості частинок ZrO_2 була близькою сферичної та еліпсоїдної [20].

Відносна густина композиту зменшується зі збільшенням вмісту ZrO_2 внаслідок утворення частинками оксиду пористих агломератів та гальмування ними перерозподілу частинок міді, дифузійних процесів. Електроопір збільшується зі збільшенням вмісту ZrO_2 , що обумовлено відсутністю електронної провідності в ZrO_2 , наявністю залишкової пористості та розсіюванням на додаткових границях зерен, які утворили дисперсні частинки оксиду. Зміцнення композиту частинками діоксиду цирконію відбувається відповідно до механізму Оравана та залежності Холла-Петча [20].

Практично аналогічним чином були одержані композити Cu- 2,5, 5 та 10 мас.% ZrO_2 в роботі [21], в якій спостерігається аналогічні тенденції щодо

впливу вмісту діоксиду цирконію на властивості матеріалів. Однак слід відмітити суттєву різницю в одержаних значеннях провідності та мікротвердості композитів, яка збільшується з вмістом ZrO_2 [21].

1.3.2.2 Композити мідь-карбіди

В роботі [22] дослідили властивості композитів Cu- (10-х) об.% NbC - (0+х) об.% VC (х = 0, 1, 3, 5, 7, 9), які були одержані механічним легуванням з порошків міді, ванадію, ніобію та вуглецю з наступним пресуванням (400 МПа) та мікрохвильовим спіканням при 900 °С, 1 год. Одержані композити мали густину приблизно 80%, яка практично не залежить від вмісту карбідів ванадію та ніобію. Твердість композитів з вмістом одного з карбідів є вищою (140,9 – 146,7 HV) ніж композитів з вмістом обох карбідів (100,9-120,8 HV), ймовірно внаслідок однорідного складу та розподілу карбідів в матриці. Електропровідність композитів відносно чистої міді знаходиться в межах від 46,47 % до 47,46 % IACS. Автори вважають, що така низька електропровідність обумовлена розсіюванням електронів на границях зерен та поверхнях частинок внаслідок їх великої об'ємної частки після розмелювання [22].

В роботі [23] дослідили механічні та електричні властивості композитів Cu-NbC з вмістом карбіду ніобію 1, 5, 15 та 25 об.%, які були одержані реакційним розмелюванням з наступним іскроплазмовим спіканням при 1000 °С впродовж 10 хв при тиску 100 МПа в вакуумі 5 Па. В результаті одержані композити з густиною від 96,8% до 98,1% від теоретичної. Встановлено, що зі збільшенням вмісту карбіду ніобію від 1 об.% до 25 об.% мікротвердість композитів зростає від 162 HV до 452,9 HV, тоді як мікротвердість чистої міді становить 45 HV. В даному випадку частинки карбіду ніобію є зміцнювальною фазою, яка запобігає пластичній деформації міді шляхом блокування руху дислокацій під дією навантаження. Введення частинок NbC має протилежний ефект на електропровідність композитів, яка зменшується з 45,5% IACS для композиту Cu-1 об.% NbC до 18,6% IACS для композиту Cu-25 об.% NbC, що обумовлено низькими електричними властивостями NbC. Крім того,

збільшення вмісту NbC може призводити до зменшення розміру зерна міді та збільшення об'єму границь зерен, що у свою чергу призводить утворення додаткових бар'єрів для руху електронів [23].

Властивості композитів Cu-1 об.% ZrC та Cu-2 об.% ZrC були досліджені в роботі [24]. Дані композити були виготовлені шляхом перемішування та подрібнення в планетарному млині порошоків міді та карбіду цирконію в середовищі аргону. Одержані порошки потім були спечені гарячим пресуванням при 650 °C, 2 год при тиску 90 МПа. Розмір частинок карбіду цирконію в мідній матриці (розмір великих зерен від 5 мкм до 10 мкм, розмір дрібних зерен від 50 нм до 1 мкм) був менше 5 мкм. Під мікроскопом також спостерігалися включення оксидів, карбідів (CuFe_2O_4 , $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$) розміром від 5 нм до 200 нм. Встановлено, що зі збільшенням вмісту карбіду цирконію від 1 об.% до 2 об.% механічні та електричні властивості зменшуються. Так, твердість зменшується від 92,8 HRB до 86,2 HRB, а границя міцності на розтяг – від 657 МПа до 547 МПа. Автори вважають, що це пов'язано з низькою міцністю між мідною матрицею та частинками карбіду цирконію, в результаті на границі фаз виступають зародками для утворення тріщин. Тобто зі збільшенням вмісту тугоплавких частинок кількість слабких границь збільшується, що призводить до зменшення міцності композитів. Тим не менш, міцність композитів суттєво більша за таку для чистої міді (216 МПа). Автори стверджують, що основним механізмом зміцнення композитів є збільшення кількості дислокацій при охолодженні внаслідок генерації термічних напруг між матрицею та включеннями, а також передача навантаження на дисперсні частинки при навантаженні. Тоді як, механізм Орована не є відповідальним за зміцнення оскільки розмір частинок ZrC більше 1 мкм. Крім того, вміст від 1 об.% до 2 об.% частинок ZrC не затримує ріст зерен під час спікання внаслідок малого вмісту частинок та великої відстані між ними. Наявність дисперсних включень оксидів та карбідів, які знаходяться в матриці у вигляді домішок, може призводити до зміцнення матеріалу за механізмом Холла-Петча [24].

В роботі [25] дослідили процеси одержання та властивості композитів систем Cu-Cr, Cu-Cr-4 мас.% SiC. Порошки для виготовлення композитів складу $\text{Cu}_{99}\text{Cr}_1$, $\text{Cu}_{94}\text{Cr}_6$ (в ат.%), $\text{Cu}_{99}\text{Cr}_1$ -4 мас.% SiC, $\text{Cu}_{94}\text{Cr}_6$ -4 мас.% SiC були одержані високоенергетичним розмелюванням в кульовому млині впродовж 50 год при швидкості 400 об/хв з порошоків міді, хрому та карбіду кремнію. Під час розмелювання відбувається подрібнення частинок порошоків та зменшення розміру кристалітів приблизно від 105 нм до 16 нм та від 130 нм до 24 нм. Також відбувається розчинення хрому в міді. Відповідно до РФА, 1 ат.% Cr повністю розчинюється в міді, тоді як при вмісті 6 ат.% Cr в порошках на дифрактограмах наявні рефлекси, які належать хрому внаслідок його вмісту більше його межі розчинності в міді (0,03 ат.% при 400 °C). Повне розчинення 1 ат.% Cr в міді автори пояснюють наявністю добавки карбіду кремнію, яка підвищує розчинність хрому. Однак залишки нерозчиненого хрому ймовірно також утворили окремі сполуки, оскільки на дифрактограмах також наявні незначні за інтенсивністю рефлекси, які належать новоутвореним фазам Cr_{23}C_6 , CrSi_2 . Одержані таким чином, порошки були спечені в вакуумі при 900 °C та 1000 °C впродовж 1 год. Спінання при 1000 °C дозволяє одержати зразки $\text{Cu}_{99}\text{Cr}_1$, $\text{Cu}_{94}\text{Cr}_6$ з густиною від 87,5% до 87,6%, тоді як добавка карбіду кремнію призводить до одержання більш пористих пресовок та композитів з густиною від 82,7% до 83% після спікання. Після спікання в композитах, окрім основної фази, також наявні фази Cr, SiC, CrSi_2 , Cr_2O_3 , CuO, Cr_3Si , SiO_2 , $\text{Cu}_{15}\text{Si}_{14}$. Твердість композитів $\text{Cu}_{99}\text{Cr}_1$, $\text{Cu}_{94}\text{Cr}_6$ знаходиться в межах 1,5-1,6 ГПа, а їх провідність складає від 47,5% до 48,7% від провідності міді. Добавка карбіду кремнію підвищує провідність до 1,8 ГПа, тоді як провідність зразків знижується до 42,4% та 42,9%, відповідно, від провідності міді [25].

Цими ж авторами досліджено вплив мікрохвильового спікання на механічні та електричні властивості таких самих композитів [26]. Встановлено, що мікрохвильове спікання дозволяє одержати матеріали з густиною від 93,2% до 95,6% після спікання при 1000 °C. Одержання зразків з більшою густиною у порівнянні з такими, які були одержані спіканням в вакуумі, автори пояснюють взаємодією мікрохвильового випромінювання з карбідом кремнію, який має

великі діелектричні втрати. В результаті одержання матеріалів з більшою густиною також зросли і їх механічні властивості, а саме мікротвердість $\text{Cu}_{99}\text{Cr}_1$, $\text{Cu}_{94}\text{Cr}_6$ зросла до 1,7 ГПа, а з добавкою карбіду кремнію до 2,2 ГПа. Аналогічним чином збільшилася електропровідність матеріалів, яка у випадку $\text{Cu}_{99}\text{Cr}_1$, $\text{Cu}_{94}\text{Cr}_6$ складає від 64,9 IACS% до 65,6 IACS% та з добавкою SiC – від 63,5 IACS% до 64 IACS% [26].

В роботі [27] дослідили властивості композитів Cu-10 об.% SiC, дисперсні частинки яких були плаковані нікелем у порівнянні з такими без покриття. Частинки порошку міді мали розмір 48 мкм, а розмір частинок SiC складав 14 мкм. Щільні композити були одержані спіканням при 820 °C, 3 год з наступною гарячою екструзією з співвідношенням 10. Одержані зразки мали пористість 1,4% та 0,9% для композитів без та з нікелевим покриттям SiC, відповідно. Покриття частинок карбіду шаром нікелю призводить також до підвищення твердості, що як вважають автори, обумовлено зменшенням пористості на границі включення-матриця. При цьому електропровідність знижується з 82,63% IACS до 80,17% IACS [27]. Встановлено, що композит Cu-SiC_(Ni) має міцність на згин 445,9 МПа та залишкову деформацію 27,3% на відміну від композиту Cu-SiC з міцністю 381,5 МПа та залишковою деформацією 24,6%. Нижча міцність останнього пов'язана з менш міцним контактом включення-матриця в результаті чого частинки карбіду легко вириваються з матриці. Крім того, на границях мідь-карбід кремнію виявлено пори та домішки заліза і кисню, що також призводить до зменшення міцності. У випадку композиту Cu-SiC_(Ni) границя між фазами є чистою та суцільною за рахунок хімічної обробки. Слід також зазначити, що між міддю та нікелем утворюється твердий розчин, який у свою чергу забезпечує міцне з'єднання частинок з матрицею та передачу навантаження від матриці частинкам, що обумовлює високі значення міцності [27].

Властивості композиту Cu-15 об.% WC, як електроду для контактного зварювання, досліджені в роботі [28]. Даний композит був виготовлений високоенергетичним змішуванням порошку міді (24 мкм) та карбіду вольфраму (12,57 мкм) з наступним пресуванням, спіканням при 700 °C, 30 хв та ковкою

при тиску 130 МПа зі швидкістю 8 МПа/с. Встановлено, що збільшення часу розмелювання порошків призводить до зменшення густини зразків, ймовірно внаслідок окиснення порошків та подрібнення WC, велика кількість дрібних часток якого заважає перерозподілу частинок міді під час пресування та спікання. Збільшення кількості дрібних частинок WC також призводить до росту твердості композитів та зменшення електропровідності внаслідок більш гомогенного розподілу частинок карбіду та розсіювання на них і домішках електронів, відповідно. Виготовлені матеріали були випробувані в якості електродів для точкового зварювання сталевих листів з цинковим покриттям. Випробовування на розтяг та мікроскопічні дослідження встановили, що спостерігається лише плавлення та зварювання між шарами цинку, тоді як утворення литого ядра не відбувається внаслідок низької електричної провідності електродів. Крім того, значне нагрівання та висока пористість електродів призводить до суттєвої деформації та появи тріщин після лише 22 циклів зварювання. Збільшення густини зразків до 78% від теоретичної після динамічного навантаження при 270 МПа підвищує твердість до 151 HV та електропровідність до 69% IACS, що забезпечує утворення литого ядра при зварюванні. Однак можна очікувати, що ресурс роботи даного матеріалу також незначний [28].

В роботі [29] дослідили механічні властивості композитів Cu- 5 об.% Al_2O_3 , Cu-5 об.%TiC та Cu- 2,5 об.% Al_2O_3 -2,5 об.% TiC, які були виготовлені реакційним змішуванням та екструзією при 750 °C. Встановлено, що додавання дисперсних включень підвищує твердість міді, що особливо помітно у випадку композиту Cu- 2,5 об.% Al_2O_3 -2,5 об.% TiC. При цьому зміна твердості від температури відпалу має нелінійний характер, що пов'язано з впливом мікроструктури зразків на процес рекристалізації [29].

В роботі [30] дослідили властивості композиту Cu-5 об.% TiC в якості електроду для контактного зварювання. Даний композит був виготовлений реакційним змішуванням Cu, Ti, C з наступною екструзією одержаних заготовок. Твердість композиту та міді складає 62 HRB і 32 HRB, відповідно. Встановлено, що твердість композиту починає зменшуватись лише після

відпалу при температурі більше 650 °С, що обумовлено підвищенням температури рекристалізації за рахунок дисперсних включень. Композит Cu-5 об.% TiC також характеризується підвищеним опором до деформації при стисненні при температурі 500 °С у порівнянні з чистою міддю. Електропровідність даного композиту складає 76,9 %IACS. Композит Cu-5 об.% TiC характеризуються відносно високою стійкістю після 80 зварювань у порівнянні з чистою міддю, яку не використовують в якості електродів контактного зварювання. Підвищена стійкість композиту обумовлена дисперсними включеннями TiC розміром від 5 нм до 15 нм, які зміцнюють мідь з розміром зерен від 100 нм до 150 нм [30].

1.3.2.3 Композити мідь-бориди

Вплив добавки TiB₂ на властивості міді дослідили в роботі [32]. Для цього композити складу Cu-0,5, 1, 1,5 мас.% TiB₂ були виготовлені плавленням в індукційній печі з наступним прокатуванням. Одержані зразки характеризуються підвищеними механічними властивостями у порівнянні з чистою міддю, що пов'язано з її дисперсійним зміцненням. Однією з причин підвищення механічної міцності є взаємодія між полем напруг, що утворилося внаслідок відмінності коефіцієнтів термічного розширення компонентів композиту, та дислокаціями, що підвищує опір розповсюдженню тріщини за рахунок збільшення кількості дислокацій. Зміцнення також може відбуватися за механізмом Орована, коли дислокація проходить через дві суміжні частинки. Крім того, подрібнення розміру зерен при наявності дисперсних частинок, які виконують роль гетерогенних зародків, також забезпечує зміцнення відповідно до співвідношення Холла-Петча. При зростанні міцності композитів з вмістом TiB₂ відбувається також зменшення їх електропровідності внаслідок розсіювання електронів на домішках, точкових дефектах, дислокаціях, границях зерен, збільшення кількості яких в мідь має місце при зростанні вмісту TiB₂. Окрім цього TiB₂, як домішка, також зменшує електропровідність

композитів. Однак провідність композитів є доволі високою у порівнянні з Cu-Ni-Si (45 %IACS), Cu-Cr-Zr (81?45 %IACS), Cu_{2.5}Fe₁P (60 %IACS) [32].

Вплив добавки 0,02, 0,04, 0,06 та 0,08 мас.% La на властивості композиту Cu-1 мас.% TiB₂ досліджено в роботі [33]. Композити були одержані плавленням Cu-Ti, Cu-B, La в індукційній печі при 1300 °C з наступним литтям та прокатуванням. Спостерігається зменшення розміру частинок TiB₂ від 1132 нм до 423 нм з вмістом La до 0,04 мас.% та наступним збільшенням приблизно до 800 нм при 0,08 мас.% La. Морфологія частинок також змінюється аналогічним чином. При цьому частинки бориду стають більш круглі. Найбільш ймовірною причиною цього є те, що добавка La діє як поверхнево активна речовина та знижує поверхневий натяг розплаву та покращує змочування частинок бориду міддю. Встановлено, що зі збільшенням вмісту лантану до 0,04 мас.% відбувається зростання механічних властивостей композиту, що ймовірно пов'язано зі зменшенням розміру частинок TiB₂ та їх округленням. Тоді як при подальшому збільшенні вмісту лантану механічні характеристики знижуються, що у свою чергу обумовлено протилежним ефектом лантану на морфологію частинок TiB₂ та мікроструктуру композиту при вмісті лантану більше 0,04 мас.%. Однак зміна морфології частинок TiB₂ від вмісту лантану практично не впливає на провідність композитів. Слід лише зазначити, що введення добавки лантану призвала до покращення провідності композиту приблизно на 16 %IACS, що ймовірно обумовлено взаємодією лантану з домішками та видаленням їх у шлак [33].

Композити на основі міді з більшим вмістом TiB₂ (2,5, 5, 10 мас.%), які спечені при 650 °C впродовж 30 хв при тиску 50 МПа, були досліджені в роботі [34]. Спостерігаються аналогічні закономірності щодо впливу дисперсної добавки на властивості композитів (табл. 1). Так, границя текучості зростає від 233 МПа до 369 МПа, границя міцності на розтяг – від 309 МПа до 397 МПа, твердість – від 56,5 HRB до 97,4 HRB, а відносне подовження та електропровідність зменшується від 8,5% до 1,1% та від 75 % IACS до 45 %IACS, відповідно, при збільшенні вмісту TiB₂ від 2,5 мас.% до 10 мас.% [34].

В роботі [35] вивчили можливість одержання композитів Cu-ZrB₂ шляхом плавлення вихідних матеріалів при 1300 °С, використовуючи порошки міді, цирконію та бору. В результаті одержано композити з рівномірним розподілом бориду цирконію в мідній матриці з розчиненій в ній невеликій кількості цирконію. Розмір включень бориду цирконію знаходився в межах декількох десятків-сотен нанометрів. Встановлено, що збільшення вмісту бориду цирконію в міді з 1 до 7 мас.% призводить до росту мікротвердості з 122 до 165,5 HV_{0,2} (чиста мідь – 60 HV_{0,2}), тоді як електропровідність зменшується від 85% IACS при 1 мас.% ZrB₂ до 67% IACS при 7 мас.% ZrB₂ [35].

1.3.2.4 Композити на основі міді з іншими добавками

В роботі [36] дослідили властивості міді з добавкою 1, 3, 5 та 10 об.% графіту. Після змішування впродовж 40 год та пресування матеріал був спечений при 900 °С, 1 год в атмосфері аргону. Зразки Cu-1 об.% С та Cu-5 об.% також були спечені методом іскроплазмового спікання при 700 °С, 5 хв, 50 МПа в вакуумі. Показано, що зі збільшенням часу змішування форма частинок міді змінюється з дендритної (вихідний порошок) на пластинчасту (від 2 год до 20 год розмелювання) та на неправильну після 40 год розмелювання. Пористість композитів збільшується з часом розмелювання та після 20 год розмелювання зростає за рахунок руйнування агломератів. Встановлено, що густина композитів зростає зі збільшенням вмісту графіту ймовірно внаслідок деформації частинок графіту під час пресування та завдяки його змащувальній здатності. Однак твердість композитів знижується при збільшенні вмісту графіту, що обумовлено його низькою твердістю. Вища твердість матеріалів після ІПС скоріш за все пов'язана з меншою пористістю зразків, що також підтверджується зростанням твердості зразків виготовлених з порошків після 40 годин розмелювання. Збільшення твердості в даному випадку також може бути викликане одержанням більш дрібної мікроструктури, ніж дисперсійним зміцненням міді [36].

Випробовування композитів на міцність на стиснення показало зменшення даної властивості від 875 МПа для Cu-1 об.% С до 450 МПа для Cu-10 об.% С внаслідок крихкої поведінки графіту. Тоді як міцність на вигин зростає з вмістом графіту від 1 об.% до 5 об.% досягаючи максимуму 275 МПа, а потім зменшується до 20 МПа при вмісті 10 об.% графіту. На думку авторів, зростання міцності обумовлено зміцнювальним ефектом дисперсних включень [36].

В роботі [37] дослідили можливість використання композитів Cu-W та Cu-Mo в якості електродів для контактного зварювання сталі з цинковим покриттям, оскільки звичайні електроди мають низький ресурс роботи при зварюванні таких деталей внаслідок утворення твердого розчину та сполук між міддю та цинком. В роботі досліджені електроди складу Cu-32 об.% W, Cu-59 об.% W, Cu-47 об.% Mo та Cu-70 об.% Mo, які мали непереривний та перериваний каркас з тугоплавкої фази. Дослідження виявили, що найкращим електродним матеріалом є Cu-32 об.% W, найбільш ймовірно за рахунок того, що тугоплавка фаза не утворювала непереривний каркас, а також композит містив більше міді. Однак випробовування показали, що і хоча матеріал мав високу стійкість при зварюванні сталі з цинковим покриттям, відбувалося його руйнування внаслідок плавлення матриці на вершині електроду. Виявилось, що температури на кінці електроду є достатньо високими для плавлення шару міді, що призводило до її видавлювання, залишаючи на контактну частину електроду без міді, тобто лише каркас з частинок вольфраму. В результаті відбувалося збільшення діаметру електроду та зменшення густини струму [37].

1.4 Іскроплазмове спікання

Іскроплазмове спікання є новим та перспективним методом отримання спечених виробів. Принцип даного методу схожий на гаряче пресування, проте при іскро-плазмовому спіканні нагріваються безпосередньо і пресовка і прес-форма. Джерелом нагріву є струм, що подається на прес-форму або/та протікає крізь пресовку. Головною відміною іскро-плазмового спікання від гарячого

пресування є застосування імпульсного електричного струму. Джерелом електричних імпульсів є імпульсний генератор із програматором, який дозволяє точно контролювати частоту, силу електричних імпульсів та пристосуватися до умов спікання. Схема установки ПС показана на рисунку 1.4 [44] – [47].

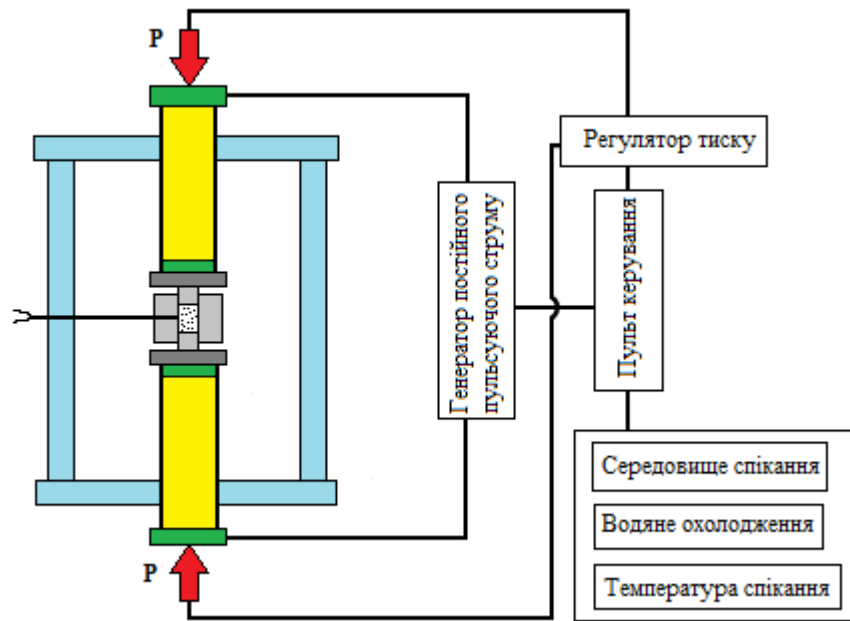


Рисунок 1.4 – Принципова схема методу іскроплазмового спікання [44]

При проходженні крізь порошок імпульсного електричного постійного струму між частинками порошку виникає електричне поле з ефектом плазми – електричних іскр. Відбувається локальне нагрівання частинок порошку, при утворенні містків у них виникає джоулеве нагрівання. При цьому видаляється зайва волога та абсорбовані поверхнями частинок газу руйнуються оксидні плівки, активується поверхня частинок порошку. Це дозволяє використовувати при спіканні значно нижчі температури ніж при звичайному та гарячому спіканні. Витрати енергії при застосуванні іскроплазмового спікання на 20 – 30 % менші ніж при гарячому пресуванні. На частинки порошку діє одночасно тиск прикладений зовні та тиск, що спричиняє електричне поле, тому отримані спечені матеріали мають майже 100% пористість [45].

Головною перевагою даного методу є висока швидкість нагрівання порошку та прес-форми, що може перевищувати значення 1000 °С. Такий спосіб дозволяє значно скоротити час витримки та тривалість процесу та уникнути рекристалізації, яка погіршує механічні властивості отриманої кераміки [46].

Виділимо 4 основні фактори, що сприяють процесу ущільнення порошку під дією електричного струму:

- використання високих швидкостей нагрівання і охолодження;
- швидка передача тепла, бо матриця діє як нагрівальний елемент;
- застосування механічного тиску, який зазвичай застосовується в традиційному процесі гарячого пресування;
- використання імпульсного струму для нагрівання зразка.

Перевагами методу ІПС є [47]:

- низьке енергоспоживання (до 30% менше за ГП);
- відсутність допоміжного спікання;
- контроль температурного градієнту;
- очищення поверхні частинок;
- висока швидкість нагріву;
- близька відповідність спеченого зразка заданим розмірам.

1.5 Висновки та постановка задач дослідження

Технологічний процес зварювання застосовується в багатьох галузях промисловості і в будівництві грає величезну роль. Особливо величезну роль відіграє контактне точкове зварювання. Авіаційна та автомобільна промисловість, вагонобудування, радіотехніка, електротехніка, машинобудування та апаратобудування, виробництво виробів домашнього вжитку і культурно-побутового призначення – всі ці галузі техніки використовують контактне точкове зварювання.

Удосконалення конструкцій, розширення галузей використання, підвищення вимог до матеріалу контактів спричиняють необхідність в

створенні або покращенні вже існуючих матеріалів для катодів. Одним з таких матеріалів може служити композит з мідною матрицею, армованою евтектичними частинками.

Метою роботи є розробка нового мідно-матричного композиту з високими механічними властивостями і електропровідністю.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

- отримати методом іскроплазмового спікання композит з мідною матрицею, армований евтектичними частинками $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$.
- дослідити структуру та фазовий склад отриманого $\text{Cu}/(\text{LaB}_6\text{-TiB}_2)$ композиту;
- визначити мікротвердість та електричну провідність отриманого $\text{Cu}/(\text{LaB}_6\text{-TiB}_2)$ композиту.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Вихідні матеріали

В якості матриці використовувався елементарний мідний порошок (чистота 99,97%) із середнім розміром зерен від 5 мкм до 20 мкм. Евтектичні частинки $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$ були отримані методом, описаним в роботі [19].

2.2 Подрібнення евтектичного порошку

Подрібнення евтектичного порошку проводили протягом 5 хвилин на швидкості 580 об / хв за допомогою планетарного кульового млина до розмір частинок отриманого евтектичного порошку менше 40 мкм.

2.3 Змішування порошків

Порошок міді і евтектичних частинок змішували в пластиковій посудині з гумовими кульками (відношення маси шихти до маси кульок 1 : 5) при частоті обертання 120 об / хв протягом 30 хв. для приготування сумішей з 2,5, 5, 7,5, 15 та 30 мас. % евтектичних частинок.

2.4 Іскроплазмове спікання

Отримана суміш завантажувалася в графітову форму з внутрішнім діаметром 20 мм і оброблялася в печі для іскроплазмового спікання KCE®-FCT HP D 25-SD (Німеччина). Зразки спікалися при температурі 950 ° C протягом 10 хв. під тиском 50 МПа в вакуумі. Швидкість нагріву до температури спікання складала близько 100 °C / хв, а середня швидкість охолодження до 600 °C становила 100 °C / хв, після чого піч охолоджувалася до кімнатної температури. Зразки оброблялися електричним розрядом і шліфувалися алмазним абразивом для подальшої характеристики

2.5 Підготування поверхні спечених зразків

Зразки після спікання готували для проведення мікроскопічних досліджень шляхом шліфування та полірування з використанням алмазних дисків до досягнення дзеркального блиску. Один із зразків був оброблений термічним травленням для отримання більш контрастного зображення для виявлення границь зерен.

2.6 Мікроструктурні дослідження зразків

Для проведення металографічних досліджень зразки були запресовані у порошок бакеліту. Після цього зразки шліфувалися за допомогою шліфувального паперу з зернистістю P180, P320, P600, P800, P1200, P2500.

Мікроструктура досліджувалась за допомогою оптичних мікроскопів Neophot 21 (рис. 2.1) і MEIJI Techno MT8520 (рис. 2.2).

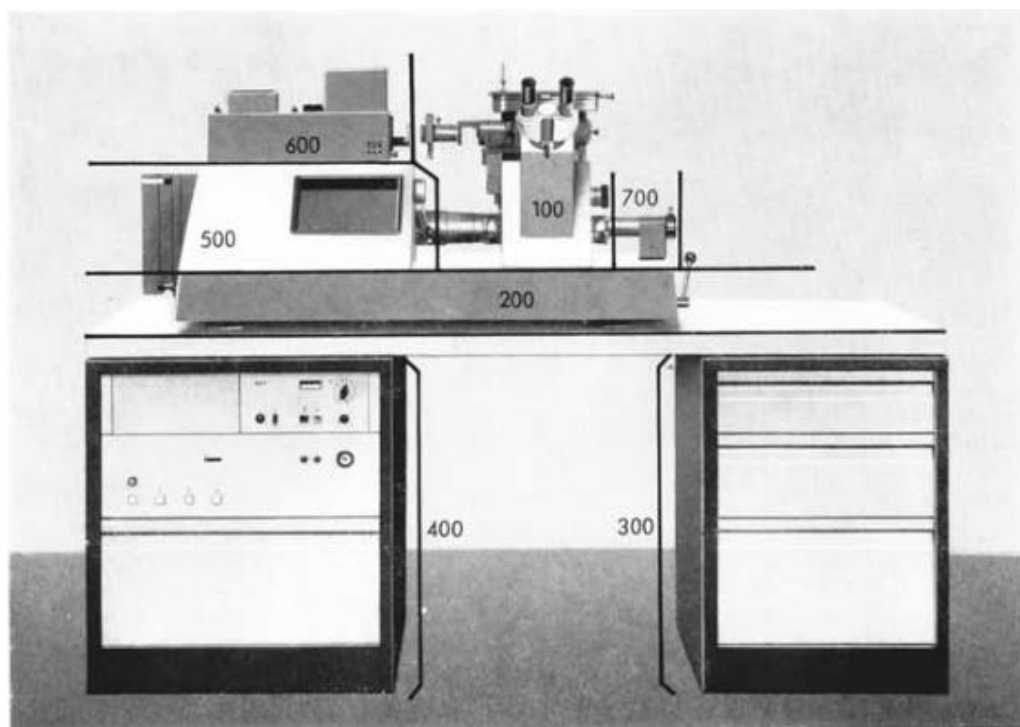


Рисунок 2.1 – Оптичний мікроскоп Neophot 21



Рисунок 2.2 – Оптичний мікроскоп MEIJI Techno MT8520

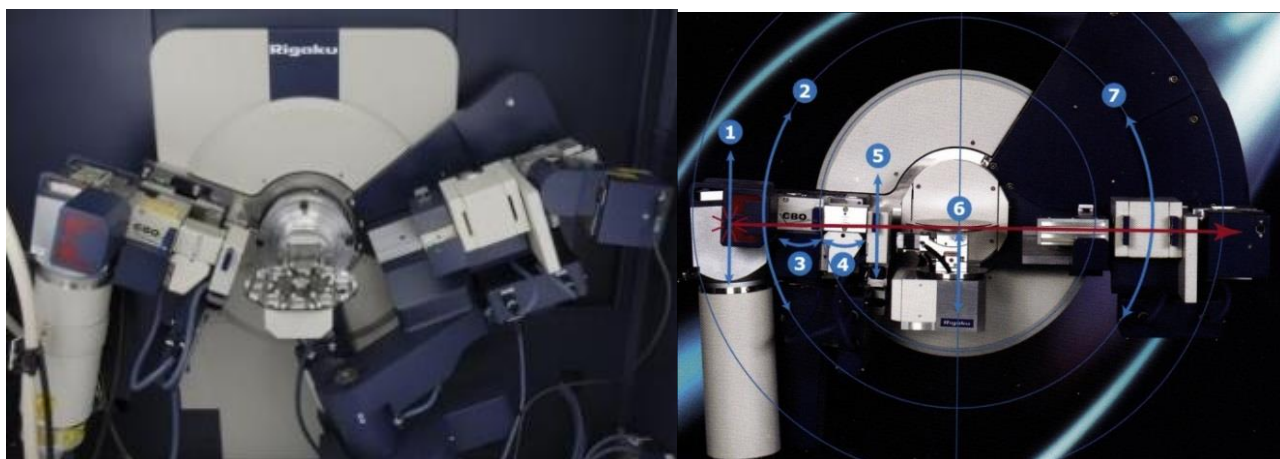
Дослідження також проводились за допомогою електронного растрового мікроскопа з камерою низького вакуума Selmi РЭМ 106 (рис. 2.3) на базі Інженерно-фізичного факультету НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».



Рисунок 2.3 – Растровий мікроскоп Selmi РЭМ 106

2.7 Рентгенофазовий аналіз

Для дослідження фазового складу сплавів було проведено рентгенофазовий аналіз. Поверхня зразків була попередньо вирівняна на алмазному кругу. Дослідження фазового складу сплавів проводились на установці Rigaku Ultima IV для сплавів досліджуваних складів. Схема камери установки Rigaku Ultima IV зображена на рисунку 2.4.



- 1 – висота джерела; 2 – кут джерела; 3 – поперечна оптична балка;
4 – кристалооптика; 5 – висота прорізу; 6 – поверхня зразка;
7 – кут ходу детектора

Рисунок 2.4 – Камера установки Rigaku Ultima IV

У процесі розшифровки рентгенограм можна виділити шість основних етапів: первинна обробка рентгенограми; ідентифікація речовин; визначення сингонії кристала та ідексування рентгенограми; розрахунок та уточнення параметрів елементарної комірки; перевірка правильності розрахунків; визначення типу ґратки Браве.

Фазовим аналізом називається встановлення числа фаз в даній системі і їх ідентифікація. Рентгенівський метод фазового аналізу ґрунтується на тому, що кожна кристалічна речовина дає специфічну інтерференційну картину з певною кількістю, розташуванням і інтенсивністю інтерференційних ліній, які визначаються природою і розташуванням атомів в даній речовині. Так як майже

немає двох кристалічних речовин, які володіли б однаковою в усіх відношеннях кристалічною структурою, то рентгенограми майже однозначно характеризують дану речовину і ніяку іншу.

У суміші декількох речовин кожна з них дає свою картину рентгенівської дифракції незалежно від інших. Отримана рентгенограма суміші являє собою суму ряду рентгенограм, які вийшли б, якби на одну і ту ж плівку по черзі знімали кожен речовину окремо.

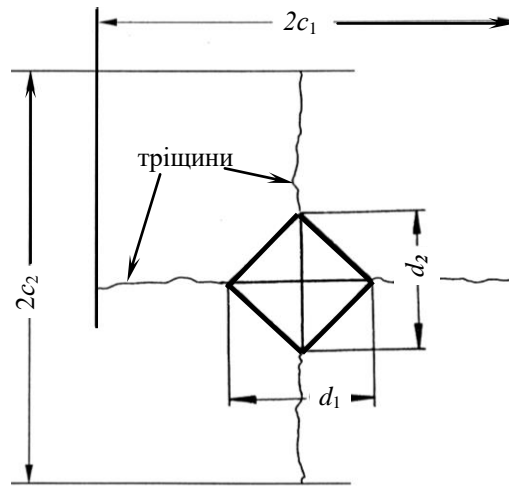
При проведенні рентгенофазового аналізу якісний хімічний склад досліджуваної речовини відомий чи можна зробити припущення про нього. Виходячи з хімічного складу зразка, можна скласти список кристалічних фаз, які можуть бути присутніми в досліджуваній речовині, або список систем, до яких такі фази можуть відноситися.

2.8 Визначення мікротвердості

Мікротвердість за Віккерсом визначають як частку від ділення сили F на площу S бокової поверхні відбитку індентора за формулою:

$$HV = \frac{F}{S} \quad (2.1)$$

Площу S визначають за результатами вимірювання середньої довжини діагоналі d відбитку після зняття навантаження, яку визначають як середнє арифметичне результатів вимірювання довжин обох діагоналей відбитку d_1 і d_2 (рис. 2.5). У випадку випробувань крихких матеріалів відбиток індентору може мати біля кутів відбитку типові радіальні тріщини.

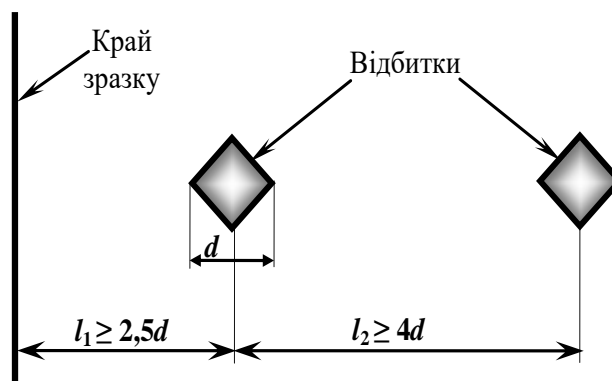


d_1 і d_2 – діагоналі відбитку індентора;

$2c_1$ і $2c_2$ – радіальні тріщини біля кутів відбитку індентору;

Рисунок 2.5 – Вигляд відбитку індентора Віккерса на поверхні зразка

Під час випробувань із застосуванням індентора Віккерса відбитки мають знаходитись від краю зразку на відстані більшій за $2,5d$ (рис. 2.6). Відстань до центру сусіднього відбитку індентору має перевищувати $4d$, де d – довжина діагоналі більшого відбитку.



d – довжина діагоналі відбитку; l_1 – відстань від центру відбитку до краю зразку;

l_2 – відстань між центрами сусідніх відбитків

Рисунок 2.6 – Схема геометричних умов випробувань індентором методом Віккерса

2.9 Визначення електричної провідності

Електричний опір визначався як:

$$\rho = \frac{S \cdot R_0}{L}$$

де S – площа поперечного перерізу зразка, м²;

R_0 – електричний опір, Ом;

L – довжина зразка, м.

Електропровідність, виражена в ІАСС, була розрахована шляхом ділення виміряного опору на міжнародний стандартний опір відпаленої міді.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рисунку 3.1 представлено спектри рентгенівської дифракції мідно-матричного композиту з різним вмістом евтектичних частинок $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$.

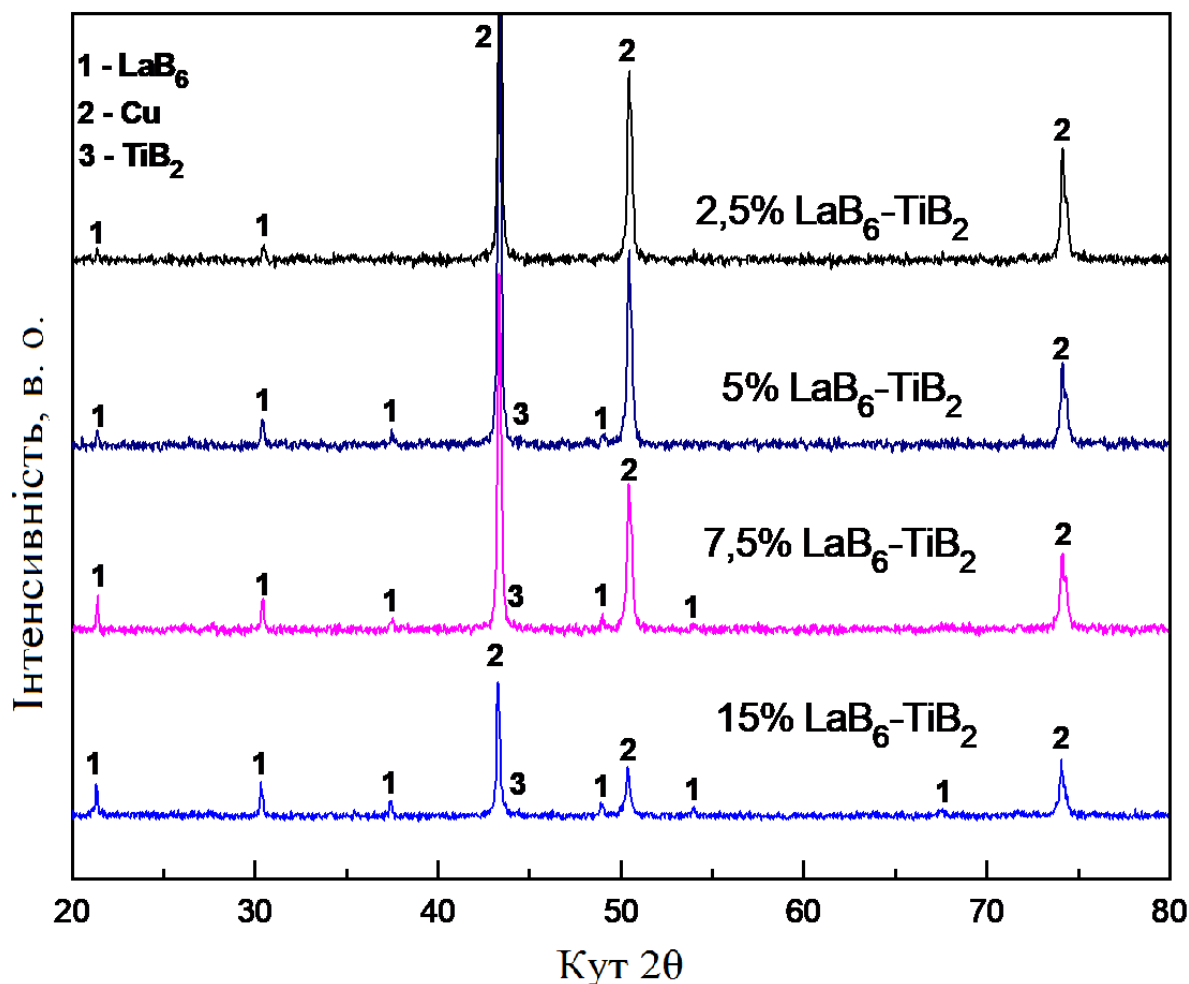
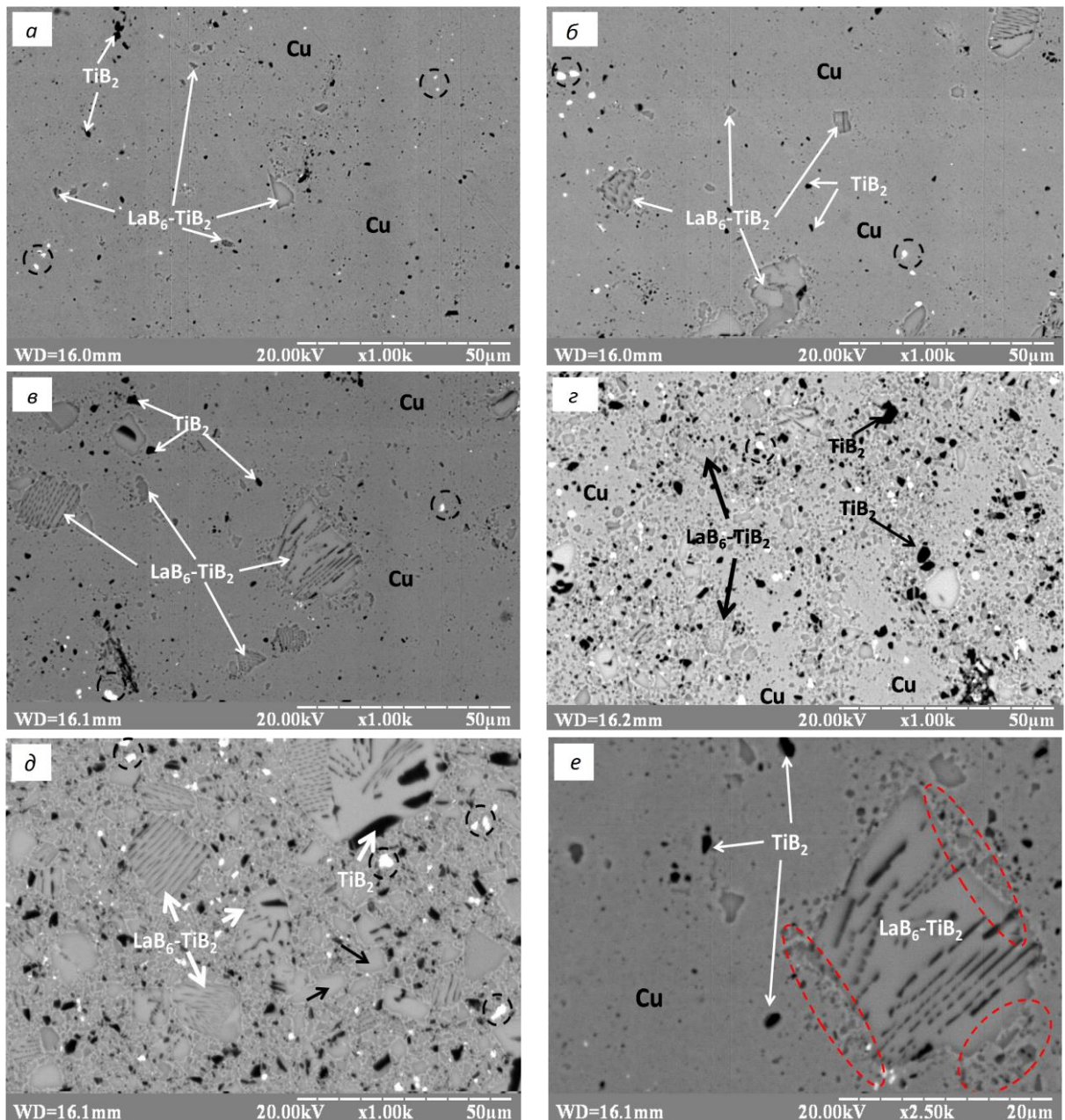


Рисунок 3.1 – Спектри рентгенівської дифракції мідно-матричного композиту з різним вмістом евтектичних частинок $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$

Рентгенівський аналіз експериментальних композитів з різними рівнями евтектичних частинок $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$ показав, що зі збільшенням вмісту $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$ інтенсивність відображення LaB_6 стає більш очевидною. Іншу фазу TiB_2 важко визначити через її невелику кількість. Утворення вторинних фаз в результаті взаємодії між армуючими частинами і матрицею при цьому не виявлено.

Результати мікроскопічного дослідження отриманих композитів представлені на рис. 3.2.



a – 2,5 мас.%; *б* – 5 мас.%; *в* – 7,5 мас.%; *г* – 15 мас.%; *д* – 30 мас.%; *е* – 7,5 мас.%

Рисунок 3.2 – СЕМ зображення мікроструктури Cu/(LaB₆-TiB₂) композиту з різним вмістом евтектичних частинок LaB₆-TiB₂

Мікроструктура отриманих композитів являє собою мідну матрицю з включенням евтектичних частинок LaB₆-TiB₂. На додаток до цих структурних елементів спостерігається також невелика частка білої фази, яка є карбідом вольфраму, що виник через намел під час подрібнення. Чорні області належать

TiB₂, а світло-сірі можна віднести до часток LaB₆. Це можна пояснити взаємодією між матричною фазою LaB₆ евтектичних частинок і міді, що призводить до виділення фази TiB₂ з матриці LaB₆. Зі збільшенням частки евтектичних частинок до 15 мас. % та 30 мас. % кількість вільних частинок TiB₂ після ІПС також збільшується.

В роботі [29] було показано, що хімічна взаємодія між TiB₂ і Cu не відбувається, в той час як в цій системі присутні тільки сили фізичного взаємодії (такі як сили Ван-дер-Ваальса). Однак процес змочування і взаємодії відбувається в системі LaB₆-Cu, як було показано в роботі [30], де автори підкріпили результати вимірами твердості в контактній зоні і місцевим хімічним аналізом. Більш того, утворення дрібних частинок (імовірно LaB₆) було зафіксовано в мідному розплаві поблизу субстрату LaB₆.

Аналіз мікроструктури композиту з 7,5 мас. % евтектичних частинок (рис. 2 f) виявив часткове розчинення LaB₆, що призводить до утворення дрібних частинок (менше 1 мкм в діаметрі). Дане спостереження пояснює наявність в мідній матриці частинок TiB₂, що утворюються в результаті їх виділення з матриці LaB₆. Таким чином, взаємодія частинок LaB₆-TiB₂ з мідною матрицею забезпечує сильну адгезію, сприяє підвищенню механічних і електричних властивостей.

Крім того, відсутність утворення вторинних фаз (рис. 1) дозволяє легко контролювати фазовий склад композиту і, таким чином, прогнозувати механічні та електричні властивості.

У всіх отриманих композитах при цьому відсутня пористість як в композиті, так і в мідній матриці.

Взаємозв'язок між твердістю, електропровідністю і вмістом евтектичних частинок показана на рис. 3.3. Встановлено, що твердість композиту поступово збільшується з підвищенням вмісту евтектичних частинок. Максимальна твердість становить 490 HV_{9,8} для міді з 30 мас. % LaB₆-TiB₂. З додаванням 7,5 мас. % LaB₆-TiB₂ твердість композиту (140 HV_{9,8}) приблизно в 3 рази вище, ніж у недеформованої міді (45 HV_{9,8}). Підвищена твердість Cu/(LaB₆-TiB₂) вище, ніж у чистої міді, за рахунок включень LaB₆-TiB₂ [31].

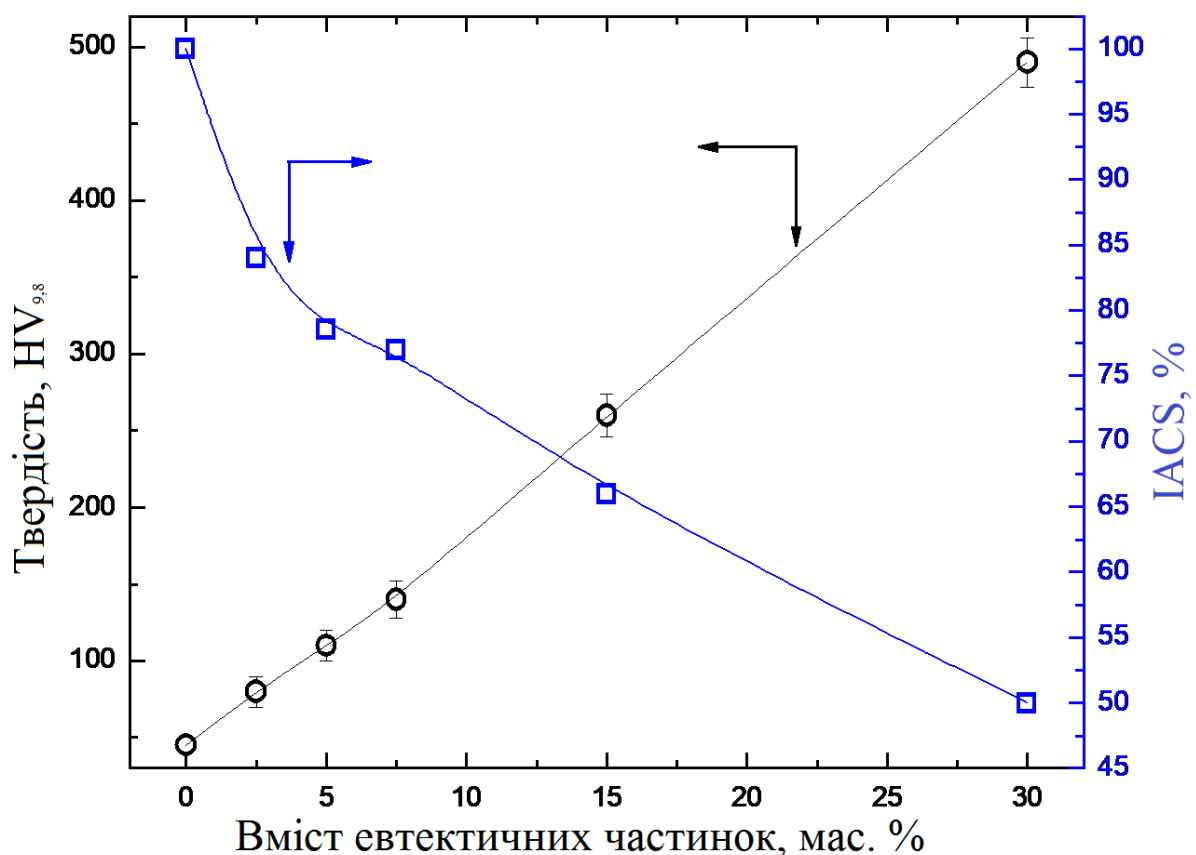


Рисунок 3.3 – Вплив вмісту евтектичних частинок на твердість та електропровідність Cu/(LaB₆-TiB₂) композиту

Відомо, що в металах пластична деформація може бути значно пригнічена армуючою фазою, яка блокує дислокаційний рух в м'якій металевій матриці під механічним впливом [32]. Так, в композиті Cu/(LaB₆-TiB₂) частки LaB₆-TiB₂ перешкоджають руху дислокацій в м'якій мідній матриці, приводячи до підвищення твердості композиту. Тому зрозуміло, що при більш високій частці LaB₆-TiB₂ твердість вище, оскільки більше дислокацій блокується і переміщується навколо армуючи частинок. Крім того, утворення дрібних частинок TiB₂ і LaB₆ під час ІПС підсилює ефект зміцнення в композиті.

Було відзначено, що електропровідність композиту поступово знижується зі збільшенням частки LaB₆-TiB₂. Максимальна електропровідність 84% досягається при мінімальному вмісті LaB₆-TiB₂, а мінімальне значення 50% навпаки.

Добре відомо, що додавання будь-якого армуючого компоненту призводить до збільшення середнього вільного пробігу електронів, що знижує електропровідність. Однак збільшення вмісту $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$ з 2,5 мас. % до 15 мас. % призводить до відносно незначного зниження електропровідності з 84 % до 71%. З одного боку, це можна пояснити відносно високою електропровідністю евтектичних частинок $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$, обумовлено їх унікальною структурою. З іншого боку, взаємодія між LaB_6 і мідної матрицею забезпечує формування чітких меж між ними і формування тонкої структури, що підсилює вторинні фази (LaB_6 , TiB_2).

Таким чином, за допомогою ІПС технології було отримано щільні композити $\text{Cu}/(\text{LaB}_6\text{-TiB}_2)$ з різним вмістом евтектичних частинок $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$. Твердість отриманих композитів збільшується від 80 HV до 490 HV зі збільшенням вмісту $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$ від 2,5 мас. % до 30 мас. %, а значення електропровідності за IACS зменшуються від 84 % до 50 %. З'ясовано, що хімічна взаємодія міді і LaB_6 призводить до розчинення і утворення дрібних частинок LaB_6 . Отримані результати значно розширюють можливі перспективи виготовлення та застосування мідно-матричних композитів, армованих евтектичними частинками $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$, що мають високу електропровідність і міцність.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Метою роботи є дослідження структури та властивостей мідно-матричного композиту, армованого евтектичними частинками $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$. Для виготовлення зразків максимально можливої щільності (99,9%) було застосовано технологію іскроплазмового спікання.

В більшості випадків проведення дослідів з надтвердими матеріалами можна частково прирівняти до малосерійного виробництва надтвердих матеріалів.

При проведенні експерименту важливо дотримуватись вимог та правил охорони праці, адже виробництво виробів з надтвердих матеріалів несе багатогранну небезпеку, на кожному етапі є окремі фактори ризику, а саме: подразнення слизових оболонок носу, горла та захворювання легневих тканин; можливість отримати пошкодження різної ступені важкості в разі неакуратної роботи з шліфувальним обладнанням та інше.

4.1 Безпека технологічного обладнання

В даній роботі використовувався апарат ІПС (іскро-плазмового спікання).

ІПС-установка типу KCE®-FCT HP D 25-SD обладнана 25 тонним пресом; вакуумною камерою (з можливістю використання інертного газу). Камера щільно зачиняється електронним замком під час проходження процесу спікання, що унеможливорює нещасні випадки. Контроль температури здійснюється за допомогою термопари у випадках коли є необхідність контролювати температуру всередині зразка та пірометр для контролю температури оболонки.

Ознаками пристрою є матриця із пуансонами, що підключені до джерела живлення, встановлені у герметичній камері, нагрівальні елементи, струмопровідні електроди, струмопровідні вставки, прохідні ізолятори із джерелом живлення.

Процес іскроплазмового спікання порошків виконують відповідно експериментально встановлених рекомендаціям по величині тиску, температури та тривалості дії на порошок, що спікається.

У ПС технології ущільнення порошку використовується імпульсний постійний струм з високим значенням сили струму від 16 до 26 А та питомій енергії обробки від 25 до 40 МДж/кг. Для швидкого та рівномірного розподілу енергії іскрової плазми між частинками струм подається рівномірно на зразок крізь весь об'єм пуансонів.

Система ПС дозволяє обробляти електропровідні, діелектричні і композитні матеріали до будь-якого ступеня щільності, включаючи ущільнення до безпористого стану (щільність до 99,99%), з високою однорідністю структури по об'єму. Дана технологіє є недефективною при отриманні високощільних наноструктурних матеріалів, оскільки дозволяє проводити нагрів до температури консолідації зі швидкістю до 500 °С/хв.

Робоче заземлення необхідне для забезпечення ефективної та безперервної роботи електроустановок всього підприємства. Для належного функціонування електроустановок виконується навмисне з'єднання металевого корпусу з землею обладнання за допомогою ізольованого мідного дроту.

Також, можна згадати про процес шліфування на шліф-полірувальному верстаті 3E881M, де використовуються алмазні порошки різної зернистості і використовуються засоби захисту дихальних шляхів від нано-частинок матеріалів, що перемелюється (розмір частинок знаходиться у діапазоні 1-100 мкм), під час процесу шліфування на абразивну поверхню постійно подається проточна вода, що повністю унеможливорює поширення дрібної фракції у повітрі. Також використовуються спеціальні рукавиці для уникнення механічного пошкодження шкіри рук під час проведення шліфування на абразивній поверхні.

4.2 Безпека технологічного процесу

Одними із основних процесів, що використовувалися в цій роботі та несуть в собі потенційний ризик були: змішування порошків, спікання та шліфування.

При змішуванні у автоматизованій герметичній ємності частинки порошку (розмір частинок знаходиться у діапазоні 1-100 мкм) із резиновими кулями діаметром 10мм використовуються захисні окуляри та гумові рукавиці для захисту від забруднення шкіри та потрапляння у очі частинок порошку під час немеханізованого розвантаження після проведення процесу розмелу.

Усі виробничі приміщення, при завантаженні та відвантаженні приладів, в атмосфері яких можлива поява шкідливих для здоров'я працівників викидів, обладнані припливно-витяжною вентиляцією.

Процес спікання у установці ІПС є найнебезпечнішим із процесів оскільки поєднує в собі роботу з високими тисками, температурами та електричним устаткуванням, що ізольоване металевим теплоізольованим кожухом для запобігання ураження уламками зразків та матриці, обладнане оглядовим круглим прозорим броньованим вікном діаметром 10 см.

До роботи на апаратах високого тиску допускаються працівники, які мають право на обслуговування цих апаратів. Магістрант під час виконання роботи мав змогу лише спостерігати процес спікання знаходячись поряд із установкою, а будь-які маніпуляції із установкою проводились спеціально проінструктованими працівниками корпусу №9.

Усі апарати високого тиску обладнують контрольно-вимірювальними приладами, покази значень яких виводяться на монітор апарату та запобіжними пристроями, що унеможливають відхилення режиму роботи апарата (тиск, температура, деформація зразка, тощо.) від допустимих значень, що рахуються автоматично самим апаратом.

Робочі частини установки розроблені таким чином, аби при своїй роботі стабільно витримувати робочі навантаження. Таким чином матриця, що вміщує у собі порошок, що спікається, виготовлена зі щільно пресованого вуглецю заданої форми, який витримує температуру нагріву зразка до 3000°C а

також являє собою дуже ефективний тепло ізолятор, дозволяючи надати форму зразку та щільно утримувати розплав у заданому об'ємі.

Установка під час роботи не має негативного впливу на організм людини, оскільки робота проводиться один раз на день в короткий час (до однієї години без постійного перебування поряд із апаратом), що повністю виключає шкоду організму людини. Установка розміщена у підвальному приміщенні корпусу через значні габарити (висота близько трьох метрів).

Завантаження та розвантаження апаратів високого тиску здійснюють вручну. Механізми використовуються тільки при потребі розпресувати зразок з матриці, що входить до комплексу функцій установки. Розвантаження установки вручну виконують не менше двох працівників у захисних печатках для запобігання забруднення шкіри стінками матриці. Зразок під час розвантаження є кімнатної температури, оскільки під час циклу установки відбувається не тільки поступовий нагрів зразка, а і поступове охолодження – такий режим забезпечує не тільки безпечне розвантаження апарату, а і більш рівномірний розподіл напружень всередині зразка, що підвищує міцність та унеможливорює контакт із атмосферним повітрям, що може призвести проникнення кисню у розігрітий зразок.

Визначення тиску і температури в комірці високого тиску проводяться в спеціальних градувальних комірках, максимально наближених у працюючій установці ІПС, з допомогою традиційних методик: вимірювання тиску з допомогою датчиків тиску, таких як вісмут, селенід свинцю; температури з використанням термопари, а саме хромель-алюмелієвої. У процесі нагрівання отримуються показання термопари, що розміщена у середині верхнього пуансона та підведена якомога ближче до зразка, що спікається. Покази проходять обробку комп'ютерною системою апарата та виводяться на спеціальний монітор у режимі реального часу, тому робітник, що проводить дослід, може контролювати процес за власним бажанням, вносити зміни у задану програму нагріву та на свій розсуд зупинити процес. Різко зупинений процес нагріву не дає змоги дістатись розпеченого зразка, аж поки він не

охолоне до кімнатної температури, тоді автоматичний замок дасть змогу відкрити герметизуючий важіль

Проводяться заходи, що застерігають від ураження електричним струмом, тобто перевірка повної справності електропроводів; обладнання має на корпусах елементи заземлення та надійно заземлене під'єднанням до спеціалізованого щитка, який встановлений на стіні у лабораторії.

Також установка обладнана датчиками, що не дають змогу розпочати процес подачі напруги у робочий об'єм камери до тих пір, поки не присутнє щільне зачинення захисної панелі із броньованим віконцем за допомогою спеціального герметизуючого замка, що керується системою апарата ІПС.

Таким чином, використання пристрою для іскроплазмового спікання порошків дозволить віддалити прохідні ізолятори струмопроводів від матриці, що нагріта до високих температур і за рахунок цього забезпечити надійність роботи пристрою та підвищити допустимий рівень температури, яка досягається в пристрої. Це дозволяє здійснювати спікання порошків тугоплавких металів. Крім того, малий внутрішній об'єм робочої камери дозволяє швидше за альтернативні пристрої виконувати вакуумування камери та збільшити продуктивність пристрою.

Роботи в апаратах високого тиску здійснюються відповідно до вимог, зазначених у розробленій в Київському Політехнічному Інституті ім. Ігоря Сікорського інструкції, в якій передбачають:

- а) підготовку апарата до зупинки із вжиттям заходів, що унеможливають його помилковий пуск і подачу живлення до нього;
- б) порядок дій працівників у разі аварійної зупинки апарата;
- в) порядок допуску працівників для роботи в захисному апараті та заходи безпеки;
- г) порядок введення апарата в експлуатацію.

Детально розглянувши технологічні процеси з погляду охорони праці та безпеки в надзвичайних випадках, можна прийти до висновку, що всі технологічні процеси задовольняють нормам, що встановлені законодавством.

Все обладнання має певні захисні деталі чи пристрої: прозорий міцний кожух, звукове оповіщення (сигналізація), автоматична система вимкнення та інше. Робочі місця – комфортні, із наявністю можливості відпочинку та є спеціально відведені місця для нагляду за роботою обладнання та технологічними процесами. Частина робочих процесів повністю автоматизована. Устаткування виконане з матеріалів, що мають тривалу гарантію від виробника. Присутня герметизація на відповідних ділянках. Технологічні процеси максимально усувають контакт із небезпечними впливами на організм людини.

5 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

В даній роботі використовувались апарати високого тиску (АВТ) типу ковадло з заглибленням. Експлуатація АВТ здійснювалася на пресових

установках ДАО-044 конструкції Рязанського заводу пресового обладнання, що розвиває зусилля 25 МН при діаметрі плунжера 520 мм.

У даному розділі проведемо розрахунок кількості електроенергії, необхідної для забезпечення роботи цеху.

Обсяг витрат електроенергії визначають на підставі вибору і розрахунку кількості технологічного обладнання, використання його встановленої потужності при запланованому режимі роботи :

$$\mathcal{E} = M \times \Phi_0 \times \eta_{\text{зг}} \times K_1 \times K_2, \quad (5.1)$$

де M – встановлена потужність обладнання, кВт;

Φ_0 – річний фонд часу роботи обладнання, год.;

$\eta_{\text{зг}}$ – коефіцієнт завантаження обладнання;

K_1 – коефіцієнт одночасності роботи (приймається рівним: для електричних печей – 0,6; для генераторів високочастотного нагріву – 0,8);

K_2 – коефіцієнт використання потужності (приймається рівним 0,7).

В умовах малотоннажних виробництв транспортувальне обладнання вибирають разом з основним, а його характеристики вносять у відомість основного обладнання.

Витрати енергії для санітарно-технічних пристроїв (вентиляції, опалення) визначають у відповідності з вимогами по охороні праці та техніки безпеки.

Витрати енергії на компресійні і вакуумні установки розраховують на основі потужності встановлених у цеху пристроїв та режимах їхньої роботи.

За формулою 5.1 було проведено розрахунок обсягу витрат електроенергії на виробниче обладнання, а результати розрахунків самих витрат електроенергії зведено до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Витрати електроенергії на роботу обладнання

Найменування	Кількість споживання	Потужність,	Фонд робочого	Коефіцієнт завантаження	Коефіцієнт	Коефіцієнт використання	Річні витрати
--------------	-------------------------	-------------	------------------	----------------------------	------------	----------------------------	------------------

споживача струму	вачів	кВт	часу на рік, год	таженості	одночас- ності	ростання потужнос- ті	електро- енергії, кВт·год
Планетар- ний млин	2	12	100	0,6	0,8	0,7	800
ІПС- установка KCE®- FCT HP D 25-SD	2	60	200	0,8	0,6	0,7	8064
Усього витрат, кВт×год							8864

Розрахунок витрат енергії на освітлення для кожного приміщення виконують на основі загального плану цеху. Вихідні данні для розрахунку: площа приміщення, необхідна освітлюваність і режим роботи освітлювальних пристроїв.

Витрати енергії на освітлення розраховують за формулою:

$$Q = \frac{S \times q \times \tau \times f}{1000}, \quad (5.2)$$

де S – освітлювальна площа, м²;

q – поверхнева щільність теплового потоку, Вт/м²;

τ – число годин горіння на рік;

f – коефіцієнт одночасного горіння.

Величину q зазвичай приймають: для виробничих приміщень – від 11 Вт/м² до 15 Вт/м², для побутових і службових приміщень – 10 Вт/м².

Залежно від тривалості освітлювального періоду значення τ приймають рівним: для двозмінної роботи – 2500 год., для тризмінної роботи – 4700 год.

Коефіцієнт, який враховує одночасність горіння ламп, приймають: для виробничих прогонів – 0,8; для побутових та службових приміщень – 0,7; для

підвалів – 0,9.

За формулою 5.2 було проведено розрахунок обсягу витрат електроенергії на освітлення виробничих приміщень, а результати розрахунків витрат електроенергії зведено в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 – Витрати електроенергії на освітлення

Найменування споживача	Освітлювальна площа, м ²	Поверхнева щільність теплого потoku, Вт/м ²	Кількість годин горіння на рік, год	Коефіцієнт одночасності горіння	Річні витрати електроенергії, кВт·год
Виробнича лабораторія	150	11	2500	0,8	3300
Усього витрат, кВт·год					3300

6 ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

6.1 Розрахунок чисельності виробничих робітників

Методика розрахунків планової чисельності працівників окремих категорій визначається специфікою їхньої роботи та галузевими особливостями функціонування підприємства. Для визначення загальної чисельності промислово-виробничого персоналу на плановий період використовують метод коректування базової чисельності або метод розрахунку планової чисельності на підставі повної трудомісткості виготовлення продукції.

Чисельність працівників, зайнятих на нормованих роботах ($\mathcal{C}_{p.n}^{пл}$), розраховують за формулою:

$$\mathcal{C}_{p.n}^{пл} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \times m_i}{T_{p.ч} \times K_{в.н}}$$

де n – кількість найменувань продукції;

t_i – планова трудомісткість одиниці i -го виду продукції, нормо-годин;

m_i – кількість продукції i -го виду, одиниць;

$T_{p.ч}$ – ефективний час роботи одного робітника, год. (табл. 6.1);

$K_{в.н}$ – очікуваний коефіцієнт виконання норми (1,0 – 1,5).

Чисельність основних робітників, зайнятих на ненормованих роботах ($\mathcal{C}_{oc}^{пл}$) (контроль технологічного процесу, управління апаратами, машинами та іншим устаткуванням), розраховують за нормами обслуговування, а саме:

$$\mathcal{C}_{oc}^{пл} = \frac{m_o \times \Pi_{зм} \times K_{п}}{H_{об}},$$

де m_o – кількість обслуговуваних об'єктів;

$\Pi_{зм}$ – кількість робочих змін протягом доби;

$K_{п}$ – коефіцієнт переведення явочної чисельності в облікову;

$N_{об}$ – норма обслуговування (кількість одиниць обладнання, що обслуговує один працівник).

Таблиця 6.1 – Баланс робочого часу середньооблікового працівника

Показники	Планові значення
Кількість календарних днів	365
Вихідні та святкові дні	109
Час на планово-попереджувальний ремонт, днів	10
Номінальний фонд робочого часу, днів	246
Невиходи на роботу, днів	26
з них:	
відпустка	20
захворювання	4
дозволені законом	1
з дозволу адміністрації	0,5
прогули	0,5
цілодобові простої	0
страйки	0
Явочний робочий час, днів	220
Середня тривалість робочого дня, год.	7,9
Внутрішньо змінні втрати робочого часу та простої, год	0,3
Робочі години	7,6
Ефективний фонд робочого часу за рік, год.	1672

Коефіцієнт переведення явочної чисельності в облікову розраховується за формулою:

$$K_n = \frac{100}{(100 - k)},$$

де k – плановий відсоток невиходів на роботу.

$$\text{За даними таблиці 5.1 } k = \frac{26}{246} \cdot 100 = 10,6.$$

Чисельність допоміжних працівників ($Ч_{д}^{пл}$), для яких неможливо встановити норму обслуговування та розрахувати трудомісткість робіт, визначають за кількістю робочих місць за формулою:

$$\mathcal{C}_{\text{д}}^{\text{пл}} = \Pi_{\text{р.м}} \times \Pi_{\text{зм}} \times K_{\Pi}$$

де $\Pi_{\text{р.м}}$ – кількість робочих місць (визначається за планом цеху).

Загальну чисельність робітників цеху, як основних, так і допоміжних, округлюють до найближчого цілого числа.

Результати розрахунків чисельності основних і допоміжних робітників (за робочими місцями) наведено в таблиці 6.2.

Чисельність управлінського персоналу встановлюють, виходячи з організаційної структури управління цехом (дільницею) на аналогічному підприємстві.

Таблиця 6.2 – Чисельність основних і допоміжних робітників цеху

Професія, спеціальність	Квалфі ка- ційний розряд	Явочна чисельність по змінах			Загал ом на добу	Коефіцієнт переведення явочної чисельності в облікову	Обліко ва чисель ність
		1-а	2-а	3-а			
Основні робітники							
Інженер-технолог	4	3	3	-	6	1,12	7
Спікальник	5	2	2	2	6	1,12	7
Разом		5	5	2	12		14
Допоміжні працівники							
Наладчик	6	1	1	1	3	1,12	4
Черговий слюсар-електрик	5	1	1	1	3	1,12	4
Вантажник	2	1	1	-	2	1,12	3
Разом		3	3	2	8		11
Усього робітників		8	8	4			25

6.2 Визначення фондів заробітної плати

Основним організаційно-правовим інструментом обґрунтування диференціації зарплати працівників підприємства різних форм господарчої

діяльності є тарифно-посадова система, основні елементи якої: тарифно-кваліфікаційні довідники; кваліфікаційні довідники посад керівників, спеціалістів і службовців; тарифні сітки й ставки; схеми посадових окладів або єдина тарифна сітка. Працюючи над проектом, можна використовувати дані підприємства-аналога.

Тарифна сітка встановлює відповідні співвідношення в оплаті праці працівників різної кваліфікації. Вона є, власне, переліком тарифних розрядів і відповідних коефіцієнтів. Установлені в Україні параметри тарифної сітки наведено в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Типова тарифна сітка робітників різногалузевих підприємств та організацій

Показник	Тарифні розряди							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Тарифні коефіцієнти	1,0	1,088	1,204	1,350	1,531	1,800	1,892	2,0
Зростання тарифних коефіцієнтів:								
абсолютне		0,088	0,116	0,146	0,181	0,269	0,092	0,108
відносне		8,8	10,7	12,1	13,4	1,7,6	5,1	5,7

Важливим елементом тарифної системи є тарифна ставка. Її абсолютну величину визначають згідно зі встановленим державою мінімальним розміром заробітної плати. Згідно державного бюджету України на 2019 рік мінімальна заробітна плата становить: у місячному розмірі – 4173 грн, у погодинному розмірі – 25,13 грн.. Так, якщо на підприємстві тарифну ставку для першого розряду встановлено на рівні 25,13 грн, то ставка другого розряду становитиме $25,13 \times 1,088 = 27,32$ грн, третього розряду $25,13 \times 1,204 = 30,26$ грн. і т. д.

Розрахунок фондів зарплати управлінського та обслуговуючого персоналу наведено у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Розрахунок фонду заробітної плати управлінського та обслуговуючого персоналу

Штатна посада	Чисельність, осіб	Місячний посадовий оклад, грн	Річний фонд заробітної плати, грн
Керівники			
Начальник цеху	1	21000	252000
Заступник начальника цеху	2	19000	456000
Начальник дільниці	4	16000	768000
Майстер	8	14000	1344000
Разом			2820000
Спеціалісти			
Провідний інженер-технолог	1	15000	180000
Інженер-технолог II-ї категорії	2	12000	288000
Диспетчер	1	10000	120000
Разом			588000
Службовці та молодший обслуговуючий персонал (МОП)			
Обліковець	2	9000	216000
Комірник	2	9000	216000
Прибиральниця	1	6000	72000
Разом			504000
Усього по цеху (дільниці)			3912000

Розрахунок фондів зарплати основних і допоміжних робітників наведено у таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Розрахунок фонду заробітної плати основних і допоміжних робітників

Професія, спеціальність	Кваліфікаційний	тарифна ставка,	Обліковий склад, осіб	Кількість годин роботи за рік	заробітна плата, тис.	Розрахунок додаткової заробітної плати, тис. грн		Загальний фонд заробітної плати, тис.
				Р о з		Надбавки та доплати	а з о	

							Премії	За роботу в особливих умовах	Оплата відпусток	Інші доплати та надбавки		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Основні (технологічні) робітники												
Інженер-технолог	4	33,93	14	1672	11704	397,1	158,8	71,5	47,6	39,7	317,6	714,7
Спікальний	5	38,47	7	1672	11704	450,3	180,1	81,0	54,0	45,0	360,2	810,5
Разом						847,4					677,8	1525,2
Допоміжні (обслуговуючі) робітники												
Наладчик	6	41,63	4	1672	6688	278,4	111,4	50,1	33,4	27,8	222,7	501,2
Черговий слюсар-електрик	5	38,47	4	1672	6688	257,3	102,9	46,3	308,7	25,7	205,8	463,1
Вантажники	2	27,32	3	1672	5016	137,0	54,8	24,7	16,4	13,7	109,6	246,7
Разом						672,7					538,1	1211,0
Усього по цеху (виробничій дільниці)						1520,1						2736,2

6.3 Розрахунок продуктивності праці

Продуктивність праці, яка відображає ефективність роботи трудового колективу, розраховують як відношення річного обсягу виробництва до облікового складу всіх працівників цеху (робітників, управлінського персоналу та обслуговуючого персоналу).

Таким чином, продуктивність праці Π – це річний обсяг продукції, виготовленої з розрахунку на одного працівника цеху:

$$\Pi = \frac{G}{\sum Ч},$$

де G – обсяг продукції, виготовленої цехом (дільницею) за рік, кг;

$\sum Ч$ – чисельність працівників усіх категорій (робітників, управлінського та обслуговуючого персоналу).

$$\Pi = \frac{47,7}{49} = 0,97.$$

7 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

7.1 Науково-технічна актуальність ДР

Актуальність досліджень мідноматричних композитів, пошуку їх особливих властивостей і технологічних рішень засвідчує постійна підтримка в Європі таких програм. В Україні роботи в області технологій отримання і дослідження композитів успішно проводять у Київському Національному Інституті ім. Ігоря Сікорського.

Інституті ім. Ігоря Сікорського є провідною в Україні організацією, де проводять роботи по вивченню процесів спікання під високим тиском порошків алмазу і кубічного нітриду бору з розміром частинок у нанодіапазоні, дослідженню фазових перетворень і реакційної здатності таких порошків та створенню композиційних матеріалів з їх використанням.

В значній мірі цьому сприяє наявність обладнання і апаратів для створення високих тисків, а також те, що в НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського вперше розроблено спосіб і отримані (методом гідравлічної класифікації на центрифугах) порошки КНБ з розміром частинок в нанодіапазоні, з вмістом 100% кубічної модифікації. Отримання такого порошку, дослідження його властивостей, фазових і структурних перетворень під дією тисків і температур, оцінки можливості створення композиційних матеріалів з їх використанням було виконано в рамках теми. Її результати показали можливість успадкування в монофазних полікристалах кубічного нітриду бору структури вихідного нанопорошку і недостатню міцність границь зерен таких полікристалів. Реакційним спіканням нанопорошків кубічного нітриду бору з добавками алюмінію і ультрадисперсного нітриду титану отримали композити з твердістю 28 ГПа. В таких зразках була досягнута гомогенність структури окремих фаз, але розподіл в об'ємі матеріалу фазових складових (і, відповідно, твердості) не відповідав структурі гомогенного матеріалу. Слід зазначити, що дослідження мідноматричних композитів із вмістом евтектичної суміші гексабориду лантану та кубічного нітриду бору є значним внеском у розвиток промисловості.

7.2 Мета та задачі науково-дослідницької роботи

Метою даної роботи є вивчення формування структури і властивостей композитів при спіканні в умовах високого тиску і високих температур порошків кубічного нітриду бору, що містять у основі мідну матрицю, структури і властивостей композитів.

Для реалізації мети роботи необхідно вирішити задачі:

- аналіз літературних даних та обґрунтування напрямку дослідження;
- розробка методики експерименту;
- дослідження впливу відсоткового вмісту складу евтектичної суміші на структуру та властивості даного матеріалу;
- рентгенодифракційний аналіз, електронна мікроскопія та мікрофрактографія, дослідження на абразивний знос;
- узагальнення отриманих результатів та формулювання рекомендацій щодо використання такого матеріалу.

7.3 Розрахунок планової собівартості проведення дослідження

Розрахунок усіх витрат на НДР, пов'язаних з виконанням даної теми, дає можливість встановити планову кошторисну вартість теми. Планування забезпечує зниження трудових і матеріальних витрат з метою отримання найкращих результатів за найменших витрат.

Планова собівартість визначається за наступними статтями витрат:

- заробітна плата науково-дослідницького персоналу;
- єдиний соціальний внесок;
- вартість спец. обладнання для виконання НДР;
- вартість матеріалів, необхідних для проведення НДР;
- витрати на службові відрядження;
- інші прямі невраховані витрати по темі;
- накладні витрати.

7.3.1 Розрахунок фонду заробітної плати виконавців

Витрати за цією статтею включають заробітну плату працівників усіх категорій, зайнятих виконанням робіт з даної теми. Заробітна плата розраховується на основі даних про трудомісткість окремих робіт, і посадових окладів виконавців цих робіт. Розрахунок ведеться в людино-днях. Перелік робіт та їх трудомісткість зведено в таблицю 7.1.

Таблиця 7.1 – Трудомісткість етапів дипломної роботи

Етапи НДР	Трудомісткість, людино-днів				Разом, людино- днів
	Ст. науковий співробітник	Інженер- дослідни к	Технік	Лаборан т	
1	2	3	4	5	6
Отримання завдання, підбір та аналіз літератури	10	10	-	-	20
Розробка методики дослідження	10	5	-	-	15
Підготування сумішей	-	2	1	3	6
Пресування і спікання	-	5	10	10	25
Проведення механічних та структурних досліджень	3	5	15	15	38
Обробка та обговорення результатів	8	10	-	-	18
Оформлення та перевірка роботи	5	13	-	-	18
Разом	36	50	26	28	140

Середньоденна заробітна плата за категоріями виконавців розраховується шляхом ділення їх посадового місячного окладу на 21,2 (де 21,2 – усереднене число робочих днів за місяць). Далі перемножуючи загальну кількість людино-

днів на відповідну середньоденну заробітну плату кожного працівника, розраховується плановий фонд заробітної плати всіх виконавців. Підсумовуючи одержані результати, визначається фонд заробітної плати з теми. Результати розрахунку фонду заробітної плати з теми зведено у таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Розрахунки витрат на оплату праці

Посада виконавців теми	Планова трудоємність, людино-днів	Заробітна плата, грн		
		Посадовий місячний оклад	Середньоденна зарплата	Усього за виконавцями
Старший науковий співробітник	36	8658,9	408,43	17054,28
Інженер- дослідник	51	4700	221,7	11306,6
Технік	26	4855	229,01	5954,26
Лаборант	28	4252	200,57	5615,96
Разом оплата праці з теми				37581

7.3.2 Єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) – це обов’язкове відрахування на загальнодержавне соціальне страхування. З 1 січня 2016 р. ставка ЄСВ складає 22 %. Базою для нарахування ЄСВ слугують загальні витрати на оплату праці по темі (табл. 7.2).

$$B_c = 37581 * 0,22 = 8267,8 \text{ грн}$$

7.3.3 Витрати на спец. обладнання для проведення експериментів

Всі роботи виконуються на обладнанні Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України. Додаткові витрати на придбання спеціальних приладів для проведення даної роботи не потрібні.

7.3.4 Визначення витрат на матеріали, необхідні для проведення експериментів

Витрати на матеріали, які необхідні для проведення даної НДР вираховуються з ціни одиниці і загальної кількості використаного матеріалу. Результати розрахунків зведені в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Вартість матеріалів, необхідних для виконання НДР

Найменування матеріалу	Стандарт, технічні умови	Використано грам	Ринкова ціна за кілограм, грн	Сума, грн.
1	2	4	5	6
Порошок CU	ГОСТ 6058-73	125,46	190	2383,74
Порошок LaB ₆	ТУ У 88.090.018-98	18,3	18299,4	334,88
Разом				2818,62

Транспортно-підготовчі витрати приймаємо на рівні 10% від вартості використаних матеріалів:

$$B_{\text{тр.}} = 2818,62 * 1,1 = 3100,5 \text{ грн.}$$

7.3.5 Визначення витрат на службові відрядження

Витрати на виробничі відрядження при даній НДР не враховуються.

7.3.6 Визначення інших прямих неврахованих витрат по темі

Ця стаття поєднує в собі всі прямі витрати на проведення НДР, що не увійшли до попередніх статей (оплата консультацій спеціалістів з інших організацій, використання обладнання інших організацій та інше).

При проведенні даної роботи інші прямі витрати складають 10% від суми врахованих витрат на НДР:

$$B_1 = (37581 + 8267,8 + 3100,5) * 0,1 = 4894,9 \text{ грн.}$$

7.3.7 Накладні витрати

За цією статтею плануються витрати на заробітну плату управлінського та загальногосподарського персоналу, єдиний соціальний внесок, витрати на допоміжне виробництво, на охорону праці та техніку безпеки, витрати на утримання та експлуатацію виробничої площі та універсального та спеціального обладнання для експериментальних цілей тощо. Накладні витрати складають 20% від суми всіх прямих витрат по НДР:

$$B_2 = (37581 + 8267,8 + 3100,5) * 0,2 = 9789,9 \text{ грн.}$$

7.3.8 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Планова калькуляція вартості проведення досліджень по темі складається на підставі виконаних розрахунків та нормативних даних (табл. 7.4).

Таблиця 7.4 – Плановий кошторис витрат на виконання НДР

Стаття витрат	Сума, грн..	Обґрунтування
Витрати на оплату праці	37581	Відповідно до розрахунків
Єдиний соціальний внесок	8267,8	Відповідно до діючих

		загальнодержавних нормативів
Вартість основних матеріалів	3100,5	Відповідно до розрахунків
Вартість спец. обладнання	–	Не передбачено
Витрати на службове відрядження	–	Не передбачено
Інші прямі не враховані витрати	4894,9	Відповідно до розрахунків
Накладні витрати	10691,86	Відповідно до розрахунків
Кошторисна вартість теми	64536,06	Сума попередніх статей

7.3.9 Науково-технічна ефективність дослідницької роботи

Дана дипломна робота є частиною комплексної теми, у зв'язку з цим розрахунок прямої ефективності її результатів не виконується. У цьому випадку можна застосувати оцінку умовної ефективності по окремих її характеристиках, кожна з яких оцінюється за 10-ти бальною шкалою:

- важливість розробки (K1) – 8 балів;
- можливість використання отриманих результатів розробки (K2) – 8 балів;
- теоретичне значення та рівень новизни (K3) – 7 балів;
- складність розробки (K4) – 7 балів.

Загальна оцінка вираховується перемноженням коефіцієнтів:

$$B = 8 * 8 * 7 * 7 = 3136$$

Умовний ефект НДР:

$$E_{\text{НДР}}^y = 100 * B - E_n * Z_{\text{ндр}},$$

де 100 – умовна вартість одного балу;

E_n – нормальний коефіцієнт економічної ефективності;

$Z_{ндp}$ – загальні витрати на НДР.

$$E_{ндp}^y = 100 * 3136 - 0,25 * 64536,06 = 297466 \text{ грн.}$$

Тоді коефіцієнт економічної доцільності визначається як відношення умовного коефіцієнту НДР до загальних витрат на НДР:

$$E = \frac{297466}{64536,06} = 4,69$$

Розрахований коефіцієнт економічної доцільності свідчить про те, що виконання даної НДР є доцільними з економічної точки зору.

7.4 Висновки з економічного розділу

Обґрунтована науково-технічна актуальність виконання досліджень по даній темі. Розраховано планово-кошторисну собівартість проведення дослідницької роботи з урахуванням всіх відомих витрат. Розраховано показник умовної економічної ефективності проведення дослідницької роботи.

8 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

8.1 Актуальність

В останні роки великого поширення серед організацій-початківців і різних об'єднань молодих вчених набули startup-проекти (стартапи). Стартап – це тільки-но створена компанія (можливо, автор навіть не є ще юридичною особою), яка будується на основі технологій, які щойно з'явилися чи знаходиться на перших стадіях розвитку і буде свій бізнес на основі нових інноваційних ідей. Стартапу характерні: швидкий розвиток, обмеженість у ресурсах; мала можливість стати відомими. Основним матеріалом, що характеризує стартап, є бізнес-план – обов'язковий письмовий документ, що визначає ділові можливості та вектор подальшого розвитку, а також роз'яснює, як ці можливості можуть бути реалізовані наявною командою.

Розробка та отримання твердих сплавів є дуже важливим завданням. Для задоволення потреб машинобудування, металообробки та інших галузей де необхідні матеріали обробки, а також для забезпечення економії дорогих і дефіцитних марок сталі, що застосовуються при виготовленні інструменту і деталей машин, необхідно розвивати та впроваджувати нові зміцнені композити. Вони можуть забезпечити довговічність та надійність деталей машин та інструменту, що працюють в складних умовах експлуатації.

Композити на основі міді потребують значного збільшення таких характеристик, як твердість та стійкість геометричних розмірів при нагріванні вище за температури плавлення міді. Водночас виникає зниження провідності таких композитів, що в свою чергу породжує необхідність додавання до міді сполук із високими значеннями електропровідності та твердості.

8.2 Мета і завдання стартап проекту

Метою розділу є формування інноваційного мислення, підприємницького духу та формування здатностей щодо оцінювання ринкових перспектив і можливостей комерціалізації основних науково-технічних розробок,

сформованих у попередній частині магістерської дисертації у вигляді розроблення концепції стартап-проекту в умовах висококонкурентної ринкової економіки глобалізаційних процесів.

Завдання розділу полягає в аналізі маркетингових перспектив реалізації запропонованих автором роботи науково-технічних рішень та пропозицій та оцінка можливостей їх ринкового впровадження.

8.3 Опис ідеї проекту

В межах підпункту слід послідовно проаналізувати певні ідеї:

- зміст ідеї (що пропонується);
- можливі напрямки застосування;
- основні вигоди, що може отримати користувач товару (по кожному напрямку застосування);
- чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників.

Результати опису подано в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Виготовлення електроду підвищеної міцності	Використання як елемент для контактного зварювання	Отримання більшої кількості зварних точок у той же час

8.4 Технологічний аудит ідеї проекту

У межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології (табл. 8.2), за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Таблиця 8.2 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її	Наявність	Доступність
--------------	---------------	-----------	-------------

	реалізації	технологій	технологій
Отримання мідноматричного композиту методом спікання методом ІПС	Спікання при високому тиску і температурі у SPS-апараті	Технологія наявна	Технологія доступна

За проведеними дослідженнями можна зробити висновок, що розробка та реалізація даної технології не створює жодних перешкод, оскільки вона існує на ринку та доступна для реалізації.

8.5 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Сегмент споживачів: для аналізу попиту на ринку дослідження звужено до рівня м. Києва. Ринок споживачів продукції – нішевий (вузький профіль – виробництва, які використовують електроди контактного зварювання).

Канали збуту: використовуються прямі канали збуту. Безпосередній контакт з потенційними покупцями через візити на підприємства та презентації виготовленого товару. Контакт через тематичні та галузеві виставки та конференції. Збут через медіа-ресурси (інтернет-магазин).

Взаємодія зі споживачами: особисті контакти менеджерів із клієнтами, по телефону, по електронній пошті. Застосування програм лояльності. Із потенційними споживачами – підтримка інформаційних ресурсів: інтернет сайт проекту із блогом новин проекту, міжнародні виставки, конференції.

Для визначення актуальності вкладення грошових та матеріальних ресурсів на впровадження даної технології варто зрівняти діючу облікову ставку НБУ та середню норму рентабельності ринку (20 %). З 25.10.2019 р.

НБУ прийняло рішення про зниження облікової ставки до 15,5 %. Таким чином, рентабельність ринку збуту є вищою, що свідчить про те, що даний проект є привабливим для інвестування.

Визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи, наведений в таблиці 8.3.

Таблиця 8.3 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Застосування довговічних електродів контактного зварювання	Виробництва, заводи, де застосовується технологія контактного з'єднання металевих частин	- Новітня техніка та технології, які застосовуються; - Високий об'єм виготовлення продукції; - Надійність, висока міцність та твердість;	– якість; – допустима собівартість; – надання чітких гарантій; – швидкість виконання

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають.

Фактори, що перешкоджають ринковому впровадженню проекту приведено в таблиці 8.4. Фактори в таблиці подано в порядку зменшення значущості.

Таблиця 8.4 – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
---	--------	---------------	--------------------------

1	Загроза появи нових конкурентів	Нові конкуренти привносять у галузь нові виробничі потужності й прагнуть роздобути частку ринку товарів збуту, знижуючи потенційний прибуток	Знижує загальну прибутковість галузі. Висока конкуренція між представниками галузі знижує прибутковість, тому що за те, щоб зберегти конкурентоспроможність, призводить до додаткових витрат (витрати рекламних ресурсів, організації збуту, наукові дослідні та дослідно-конструкторські розробки).
2	Обмеження ринку	Достатня кількість продукції, яка отримала статус бренду	Скорочення обсягів продажів у результаті порушення договірних зобов'язань.
3	Слабкий рівень технічної оснащеності	Зростання кількості потребуючої продукції змінює кількість та якість технічного обладнання	- втрати дохідності бізнесу в результаті зниження рівня репутації; - скорочення обсягів виробництва

Фактори, що сприяють ринковому впровадженню проекту приведено в таблиці 8.5. Фактори в таблиці подано в порядку зменшення значущості.

Таблиця 8.5 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Вихід на нові	Можливості розширення	Збільшує кількість продукції,

	ринки або сегменти ринку	виробництва, збуту.	що у будь якого випадку призводить до розширення виробничої діяльності
2	Розвиток НДДКР	Можливість розширення якості та швидкості вихідної продукції	Нові технології сприяють зменшенню собівартості послуги, а, відповідно, і її вартості для клієнтів; збільшенню обсягів продажу; створення/видозміна послуги.
3	Високий рівень технічної оснащеності	Можливість вербування високо кваліфікаційних спеціалістів. Вихід на новий більш прибутковий ринок	Збільшення якості та кількості продукції

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю п'яти сил М. Портера).

М. Портер вирізняє п'ять основних факторів, що впливають на привабливість вибору ринку з огляду на характер конкуренції. Це:

- контуренти, що вже є у галузі;
- потенційні конкуренти;
- споживачі;
- постачальники, що конкурують за ринкову першість;
- наявність товарів-замінників.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, а також сильних і слабких сторін приведено в таблицях 8.6 та 8.7.

Таблиця 8.6 – SWOT-аналіз стартап-проекту (Слабкі та сильні сторони)

Сильні сторони (S):	Слабкі сторони (W):
<ul style="list-style-type: none"> – молодий і кваліфікований колектив; – порівняно недорогі початкові матеріали; – наявність власного спеціалізованого устаткування; – послуга є новою для ринку. 	<ul style="list-style-type: none"> – можливі складності при серійному виробництві через необхідний режим; – додаткові транспортні витрати.

Таблиця 8.7 – SWOT-аналіз стартап-проекту (Можливості та загрози)

Можливості (O):	Загрози (T):
<ul style="list-style-type: none"> – посилення позицій на ринку; – освоєння нових сегментів ринку; – збільшення різноманітності – підвищення кваліфікації персоналу в галузі сучасних технологій, менеджменту та маркетингу. 	<ul style="list-style-type: none"> – виникнення конкурентного тиску; – плагіат зі сторони конкурентів; – поява конкурентів з товарами-замінниками.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та, відповідно, факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є прогнозованими результатами впливу факторів, і, на відміну від них, не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність самоздійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів це фактор загрози на основі якого можна спрогнозувати посилення значущості цінового фактору при виборі товарів та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Перелік слабких та сильних сторін та властивостей ідеї потенційної послуги є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності. Нові електроди мідно матричного композиту армованого евтектичною сумішшю гексабориду лантану та дибориду титану дають можливість виготовляти та

виготовляти високоякісну продукцію для клієнта з покращеними фізичними та механічними властивостями у порівнянні з існуючими пропозиціями на ринку.

8.6 Розроблення ринкової стратегії проекту

Структура ринкової стратегії, тобто рішень, що визначають взаємовідносини підприємства з ринком ресурсів, багато в чому аналогічна структурі товарно-ринкової стратегії підприємства. Так само як і у випадку товарно-ринкової стратегії, мова тут йде про двох сферах стратегічних рішень: по-перше, рішень, що визначають поведінку підприємства на ринках матеріальних факторів виробництва; по-друге, рішень про номенклатуру, обсяги та якість придбаних і тих, що використовуються всередині ресурсів.

Ринкова стратегія підприємства розробляється на основі прогнозування кон'юнктури товарного ринку, досліджень процесів на ринку і вивчення покупців, вивчення товарів, конкурентів та інших елементів ринкового господарства. Найбільш поширеними стратегіями маркетингу є:

- проникнення на ринок;
- розвиток ринку;
- розробка товару;
- диверсифікація.

Спираючись на основні характеристики послуги, варто визначитись з базовою стратегією розвитку підприємництва. Оскільки дана послуга передбачає менші витрати, порівняно із схожими видами послуг, варто застосувати стратегію спеціалізації. Це є доцільним, оскільки підприємство може завоювати клієнтів як за допомогою меншої вартості наданих послуг, так і за допомогою диференціації.

Наступним кроком є вибір базової стратегії конкурентної поведінки, результати чого зведено в таблицю 8.8.

Таблиця 8.8 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект "першопрохідцем" на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Даний проект частково є «першопрохідцем на ринку»	Компанія буде шукати нових споживачів, з розширенням продукції, компанія буде на вигідних умовах забирати споживачів у конкурентів	Компанія не буде копіювати характеристики товару, а спиратиметься лише на власні розробки	Стратегія спеціалізації

8.7 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 8.9 підсумували результати попереднього аналізу конкурентної спроможності товару.

Методика, яку планується використовувати, є унікальною. Тому за для забезпечення її від копіювання конкурентами, можна запатентувати методику.

Таблиця 8.9 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
---------	----------------------------	--

Обробка надтвердих матеріалів, твердих сплавів	Висока міцність, в'язкість, якість	Використання нанорозмірних частинок дозволить створити більш міцний каркас у матеріалі та показувати кращі властивості ніж аналоги
--	------------------------------------	--

8.8 Формування системи збуту

Аналіз системи збуту означає визначення ефективності кожного елемента цієї системи, оцінювання діяльності апарату працівників збуту. Аналіз витрат обігу передбачає порівняння фактичних збутових витрат за кожним каналом збуту і видом витрат із запланованими показниками для того, щоб виявити необґрунтовані витрати, ліквідувати затрати, що виникають у процесі руху товарів і підвищити рентабельність наявної системи збуту. Організація збуту в процесі аналізу відіграє дуже важливу роль, оскільки забезпечує зворотний зв'язок виробництва з ринком, є джерелом інформації про попит та потреби споживачів. Ось чому розробку збутової політики кладуть в основу програми аналізу як щодо кожного продукту, так і по виробничому відділенню взагалі. Якщо на основі розрахунків з'ясовується, що витрати на реалізацію нового товару дуже високі й не дають змоги забезпечити необхідний рівень рентабельності, то керівництво виробничого відділення може прийняти ухвалу про недоцільність подальшої розробки та впровадження у виробництво певного товару. Фахівці-аналітики можуть не лише визначити майбутню прибутковість виробу, а й ввести свої пропозиції щодо його вдосконалення і нових можливостей використання відповідних виробів у інших сферах.

При виборі програми збуту варто звернути увагу на те, що цільова аудиторія включає переважно осіб із середнім рівнем доходів. Таким чином, реклама та збут можуть збільшити витрати, які прямо чи опосередковано впливають на вартість послуги, не більше, ніж на 10 %. Зважаючи на вищевказане, каналами збуту можуть бути реклама в Інтернеті (соціальні мережі, тощо), рекламні листівки, банери та відносно не дорогі види реклами.

До завдань реклами відноситься, в першу чергу, інформування про відкриття підприємства, що запровадило унікальну послугу для зміцнення поверхні корпусів.

8.9 Висновки до розділу

Незважаючи на всі за і проти, розробка даного проекту є досить перспективною, оскільки сучасний ринок потребує використання більш довговічних та якісних електродів. Довговічніший інструмент із покращеними щодо існуючих на ринку значеннями міцності і твердості має зацікавити потенційних клієнтів за рахунок своєї особливо високої надійності та довговічності.

Стартап-проект має переваги над конкурентами, ідея є свіжою та має потенціал для подальшого розвитку, а поширення відгуків у мережі інтернет, імплементація і покращення технології призведе до підвищення рентабельності, що зробить проект привабливішим для вітчизняних та іноземних інвестицій.

ВИСНОВКИ

1. В роботі методом іскроплазмового спікання отримано мідно-матричні композити (ММК) з різним вмістом евтектичних частинок $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$.
2. За результатами рентгеноструктурного аналізу встановлено, що в процесі спікання не відбувається утворення нових фаз які б могли негативно вплинути на електричну провідність композиту.
3. Встановлено, що мікроструктура отриманих композитів являє собою мідну матрицю з включенням евтектичних частинок $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$. На додаток до цих структурних елементів спостерігається також невелика частка карбіду вольфраму, а також частинок TiB_2 та LaB_6 , частка яких збільшується зі збільшенням масового вмісту евтектичних частинок.
4. Встановлено, що твердість композиту поступово збільшується з підвищенням вмісту евтектичних частинок. Максимальна твердість становить $490 \text{ HV}_{9,8}$ для міді з 30 мас. % $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$, а мінімальна становить $140 \text{ HV}_{9,8}$ при додаванні 7,5 мас. % $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$.
5. Було відзначено, що електропровідність композиту поступово знижується зі збільшенням частки $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$. Максимальна електропровідність 84% досягається при мінімальному вмісті $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$, а мінімальне значення 50% навпаки.

CONCLUSIONS

1 In the work by the method of spark plasma sintering was obtained copper matrix composites (CMC) with different contents of eutectic particles $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$.

2 According to the results of X-ray diffraction analysis, it was found that during the sintering process new phases don't appear, so nothing more influence on electric conductivity parameter.

3 It was established that the microstructure of the obtained composites is a copper matrix with the inclusion of eutectic particles $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$. In addition to these structural elements, there is also a small fraction of tungsten carbide, as well as particles of TiB_2 and LaB_6 , the proportion of which increases with increasing mass content of eutectic particles.

4 It was found that the hardness of the composite gradually increases with increasing eutectic particles. The maximum hardness is 490 $\text{HV}_{9.8}$ with 30 wt. % $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$, and the minimum hardness is 140 $\text{HV}_{9.8}$ with the addition of 7.5 wt. % $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$.

5 It was noted that the electrical conductivity of the composite gradually decreases with an increase in the proportion of $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$. The maximum conductivity of 84% is achieved with a minimum $\text{LaB}_6\text{-TiB}_2$ content, and the minimum value of 50% is vice versa.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Hamed M. A review of electrical contact resistance modeling in resistance spot welding / M. Hamed, M. Atashparva // *Welding in the World*. – 2017. – Vol. 61. – P. 269-290.
2. Zhou K. Review of Application of the Electrical Structure in Resistance Spot Welding / K. Zhou, P. Yao // *IEEE*. – 2017. – Vol. 5. – P. 25741-25749.
3. Khan M. I. *Welding Science and Technology* / M. I. Khan. – Delhi : New Age International, 2007. – 278 p.
4. Messler R. W. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy* / R. W. Messler. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2008. – 685 p.
5. A review on resistance spot welding of aluminum alloys / S. M. Manladan, F. Yusof, S. Ramesh [et all.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 95. – P. 605-634.
6. Application of laser in seam welding of dissimilar steel to aluminium joints for thick structural components / S. Meco, G. Pardala, S. Gangulya [et all.] // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2015. – Vol. 67. – P. 22-30.
7. Resistance upset welding of Zr-based bulk metallic glasses / A. F. Andreolia, J. B. Ponsonib, C. S. Marcelo [et all.] // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2018. – Vol. 255. – P. 760-764.
8. Lancaster J. F. *The physics of welding* / J. F. Lancaster. – London : Elsevier, 1986. – 360 p.
9. Сплавы для электродов контактной сварки / А. К. Николаев, В. М. Розенберг. – М. : Металлургия, 1978. – 96 с.
10. Слиозберг С. К., Чулошников П. Л. *Электроды для контактной сварки*. – Л.: Машиностроение, 1972. – 96 с.
11. Hussain Z. Properties and spot welding performance of copper composite reinforced with recycled tungsten carbide / Z. Hussain, I. P. Almanar // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 154. – P. 1485-1488.

12. Wright R. N. Age-hardening behavior of dynamically consolidated rapidly solidified Cu-2%Zr powder / R. N. Wright, I. E. Anderson // *Materials Science and Engineering A*. – 1989. – Vol. 114. – P. 167-172.

13. Matsumoto J. Spot welding of aluminium alloy - electrode life for various electrodes / J. Matsumoto, H. Mochizuki // *Welding International*. – 1994. – Vol. 8. – P. 438-444.

14. Tanaka Y. An alumina dispersion strengthened copper composite electrode for spot welding / Y. Tanaka, M. Noguchi // *Welding Technique*. – Vol. 35. – P. 59-63.

15. Effect of Al₂O₃ particle size on electrical wear performance of Al₂O₃/Cu composites / A. T. Petrov, M. N. Grigor'ev, D. A. Gromov, A. N. Kozhin // *Welding International*. – 1996. – Vol. 10. – P. 1001-1002.

16. Panda S. Processing and properties of Cu based micro- and nano-composites / S. Panda, K. Dash, B. C. Ray // *Bulletin of Materials Science*. – Vol. 37. – P. 227-238.

17. Investigation on microstructure and properties of Cu–Al₂O₃ composites fabricated by a novel in-situ reactive synthesis / X. H. Zhang, X. X. Li, H. Chen [et all.] // *Materials and Design*. – 2016. – Vol. 92. – P. 58-63.

18. Effect of the MgO particles on the nanocrystalline copper grain stability / J. Durisin, K. Durisinova, M. Orolinova [et all.] // *Materials Letters*. – 2004. – Vol. 58. – P. 3796-3801.

19. Sorkhe Y. A. Mechanical alloying and sintering of nanostructured TiO₂ reinforced copper composite and its characterization / Y. A. Sorkhe, H. Aghajani, A. T. Tabrizi // *Materials and Design*. – 2014. – Vol. 58. – P. 168-174.

20. Fathy A. Production and properties of Cu-ZrO₂ nanocomposites / A. Fathy, O. Elkady, A. A. Oqail // *Journal of Composite Materials*. – 2017. – Vol. 52. – P. 1-11.

21. Elmahdy M. Microstructure and properties of Cu-ZrO₂ nanocomposites synthesized by in situ processing / M. Elmahdy, G. Abouelmagd, A. A. Mazen // *Materials Research Express*. – 2017. – Vol. 21. – P. 1-11.

22. Characterization of in-situ Cu-NbC-VC nanocomposite by mechanical alloying and microwave sintering / W. M. Omar, N. Bashirom, Z. Hussain [et all.] // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 695. – P. 344-347.

23. Spark plasma sintering of mechanically alloyed in situ copper–niobium carbide composite / B. D. Long, R. Othman, M. Umemoto [et all.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Vol. 505. – P. 510-515.

24. Lopez M. Precipitation strengthened high strength-conductivity copper alloys containing ZrC ceramics / M. Lopez, J. A. Jimenez, D. Corredor // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2007. – Vol. 38. – P. 272-279.

25. Structural investigation of vacuum sintered Cu–Cr and Cu–Cr–4% SiC nanocomposites prepared by mechanical alloying / P. Sahani, S. Mula, P. K. Roy [et all.] // Materials Science and Engineering A. – 2011. – Vol. 528. – P. 7781-7789.

26. Mechanical properties and electrical conductivity of Cu–Cr and Cu–Cr–4% SiC nanocomposites for thermo-electric applications / S. Mula, P. Sahani, S. K. Pratihari [et all.] // Materials Science and Engineering A. – 2011. – Vol. 528. – P. 4348-4356.

27. Zhan Y. The effect of interfacial modifying on the mechanical and wear properties of SiCp/Cu composites / Y. Zhan, G. Zhang // Materials Letters. – 2003. – Vol. 57. – P. 4583-4591.

28. Hussain Z. Studies on mechanical alloying of copper-tungsten carbide composite for spot welding electrode / Z. Hussain, S. B. Jamaludin // JMEPEG. – 2009. – Vol. 18. – P. 1258-1263.

29. Palma R. H. High-temperature mechanical behaviour of Cu–Ti–C, Cu–Al and Cu–Ti–Al–C alloys obtained by reaction milling / R. H. Palma, A. O. Sepulveda, R. G. Espinoza // Materials Science and Engineering A. – 2004. – Vol. 384. – P. 262-269.

30. Palma R. H. Performance of Cu–TiC alloy electrodes developed by reaction milling for electrical-resistance welding / R. H. Palma, A. O. Sepulveda, R. G. Espinoza // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 169. – P. 62-66.

31. In-situ fabrication and characterization of ultrafine structured Cu-TiC composites with high strength and high conductivity by mechanical milling / F. Wang, Y. Li, X. Wang [et all.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 657. – P. 122-132.

32. Study of enhanced dry sliding wear behavior and mechanical properties of Cu-TiB₂ composites fabricated by in situ casting process / C. Zou, Z. Chen, H. Kang [et all.] // Wear. – 2017. – Vol. 392-393. – P. 118-125.

33. Effect of La addition on the particle characteristics, mechanical and electrical properties of in situ Cu-TiB₂ composites / C. Zou, H. Kang, W. Wang [et all.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – Vol. 687. – P. 312-319.

34. Mechanical, electrical and wear properties of Cu-TiB₂ nanocomposites fabricated by MA-SHS and SPS / D. H. Kwon, T. D. Nguyen, K. X. Huynh [et all.] // Journal of Ceramic Processing Research. – 2006. – Vol. 7. – P. 275-279.

35. Microstructural features and mechanical properties of in situ formed ZrB₂/Cu composites / Z. Zhang, Y. Sheng, X. Xu [et all.] // Advanced Engineering Materials. – 2015. – Vol. 17. – P. 1338-1343.

36. Samal C. P. The effect of milling and sintering techniques on mechanical properties of Cu-graphite metal matrix composite prepared by powder metallurgy route / C. P. Samal, J. S. Parihar, D. Chaira // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – Vol. 569. – P. 95-101.

37. Key J. F. Refractory metal composite tips for resistance-spot welding of galvanized steel / J. F. Key, T. H. Courtney // Welding Journal. – 1974. – Vol. 53. – P. 261-266.

38. Temperature effect on bending strength of hot-pressed boron carbide materials / Yu. G. Tkachenko, D. Z. Yurchenko, V. K. Sul'zhenko [et all.] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2007. – Vol. 46. – P. 254-260.

39. Loboda P. Features of structure formation with zone melting of powder boron-containing refractory materials / P. Loboda // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2000. – Vol. 39. – P. 480-486.

40. Direct observation of LaB₆(001) surface at high temperatures by x-ray and ultraviolet photoelectron spectroscopy, low-energy electron diffraction, Auger

electron spectroscopy, and work-function measurements / M. Aono, R. Nishitani, C. Oshima [et all.] // Journal of Applied Physics. – 1979. – Vol. 50. – P. 4802-4807.

41. Mandrus D. Localized vibrational mode analysis of the resistivity and specific heat of LaB₆ / D. Mandrus, B. C. Sales, R. Jin // Physical Review B. – 2001. – Vol. 64. – P. 302-313.

42. Formation of extremely high current density LaB₆ field emission arrays via e-beam deposition / K. C. Qi, Z. L. Lin, W. B. Chen [et all.] // Journal of Applied Physics. – 2008. – Vol. 93. – P. 503-596.

43. Степанчук А. Н. Технология порошковой металлургии / А. Н. Степанчук, И. И. Билык, П. А. Бойко. – Киев : Выща школа, 1989. – 415 с.

44. Song S. X. Heating mechanism of spark plasma sintering / S. X. Song, Z. Wang, G. P. Shi, // Ceramics International. – 2013. – Vol. 39. – P. 1393-1396.

45. Munir Z. A. The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method / Z. A. Munir, U. A. Tamburini, M. Ohyanagi // Journal of Materials Science. – 2006. – Vol. 41. – P. 763-777.

46. ‘Beautiful’ unconventional synthesis and processing technologies of superconductors and some other materials / P. Badica, A. Crisan, G. Aldica and [et al.] // Science and Technology of Advanced Materials. – 2011. – Vol. 12. – P. 1-13.

47. Samsonov G. V. Contact interaction of refractory compounds with liquid metals: III. Wetting of metal-like borides by liquid nontransition metals / G. V. Samsonov, A. D. Panasyuk, M. S. Borovikova // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 1973. – Vol. 5. – P. 403-407.

48. Possibility of forming materials based on copper and lanthanum hexaboride / P. A. Verkhovodov, T. I. Kuz'mina, G. V. Levchenko [et all.] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 1979. – Vol. 8. – P. 559-562.

49. Influence of annealing on crucible-free float zone melted LaB₆-TiB₂ composites / T. O. Soloviova, O. P. Karasevska, J. Vleugels, P. I. Loboda // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 729. – P. 749-757.

50. Sheibani S. In situ preparation of Cu–MnO nanocomposite powder through mechanochemical synthesis / S. Sheibani, M. Khakbiz, M. Omid / Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 477. – P. 683-687.